

Experimental Definition of the Plasma Flow Energetic Parameters in the High Frequency Warming Gas Facility

V.I. Vlasov, G.N. Zalogin, N.F. Rudin

FGUP «TSNIImash», Korolev, Moscow Region, 141070, Russia

zalogin_gn@mail.ru

Abstract

Results of the plasma flow energetic parameters experimental investigation are presented in the paper. Plasma is generated in the high temperature facility with high frequency plasmatron (HF plasmatron) with energy power of 1MW. Four types of plasma formed gases were used: argon, nitrogen, air and carbonic acid gas. Gas mass flux was fixed as $G = 5$ g/s, work chamber pressure was varied as $p = 1000 \div 20000$ Pa and anode voltage input energy $N = 50 \div 300$ kW. Estimation of the HF plasmatron energy input efficiency factor is based on the direct definition of plasma plume power using special constructed heat exchange facility presented on the fig. 1. Radiation heat flux from the plasma gas discharge was measured using Gordon heat sensor with sapphire window. Heat sensor was situated at the end of discharge chamber (fig. 2). Low limits on power and gas pressure of discharge existence in the mentioned above gases were defined. It was shown that under the big levels of radiation heat fluxes from plasma plume, method of surface atoms heterogeneous recombination probability definition should be improved.

Key words: high frequency plasmatron, efficiency factor, plasma, radiation heat flux.

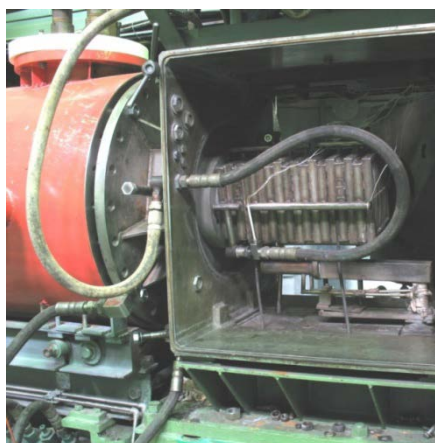


Fig. 1. Heat exchange facility in the HF plasmatron work chamber

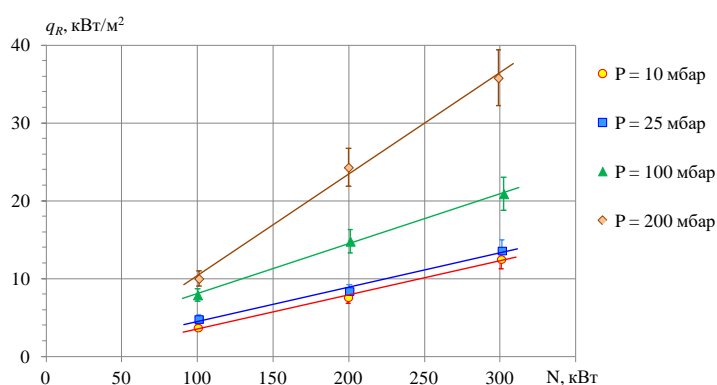


Fig. 2. Radiation heat fluxes measured using Gordon heat sensor on the plasma plume axis in dependence of energy input and gas pressure (in air)

УДК 533.6.011

Экспериментальное определение энергетических параметров плазменного потока в установке с высокочастотным нагревом газа

В.И. Власов, Г.Н. Залогин, Н.Ф. Рудин

*Центральный научно-исследовательский институт машиностроения
141070, Моск. обл., г. Королев, ул. Пионерская, 4
zalogin_gn@mail.ru*

Аннотация

В работе представлены результаты экспериментальных исследований энергетических параметров плазменных потоков в высокотемпературной установке с высокочастотным индукционным плазмотроном (ВЧ плазмотроном) мощностью 1 МВт. Эксперименты проводились с использованием четырех плазмообразующих газов: аргона, азота, воздуха и углекислого газа при фиксированном расходе газа $G = 5$ г/с, в широком диапазоне давлений $p = 10 \div 200$ гПа, и потребляемой мощности (энерговклада) $N = 50 \div 300$ кВт. Определение теплового коэффициента полезного действия (кпд) установки с ВЧ плазмотроном, основывается на непосредственном измерении мощности плазменной струи специальным теплообменником. Лучистые тепловые потоки от газоразрядной плазмы измерялись датчиком Гардона с сапфировым окном, расположенным в торце разрядной камеры. Были определены также нижние границы (по мощности) существования разряда в перечисленных газах и зависимость положения границы от давления. Показано, что при значительном уровне лучистых потоков от плазменной струи, методика определения вероятности гетерогенной рекомбинации атомов на поверхности материалов должна быть усовершенствована.

Ключевые слова: ВЧ плазмотрон, коэффициент полезного действия, плазма, лучистый поток.

1. Введение

В настоящее время при обработке материалов тепловой защиты аппаратов, входящих в атмосферы планет, все более широкое распространение получают индукционные высокочастотные плазмотроны (ВЧ плазмотроны). Они имеют целый ряд преимуществ по сравнению с высокотемпературными установками, работающими на других принципах нагрева рабочего газа. Основная часть результатов, представленная в настоящем отчете, получена на установке У-13ВЧП (ЦНИИмаш) с ВЧ плазмотроном мощностью 1000 кВт [1].

В установках с ВЧ плазмотронами проводится весьма обширная номенклатура исследований и испытаний, направленных на моделирование условий входа гиперзвуковых летательных аппаратов (ЛА) в атмосферу Земли и других планет, обработку теплозащитных материалов (ТЗМ), а также отдельных элементов ЛА, подверженных воздействию высоких тепловых потоков и контактирующих с диссоциированным и частично ионизованным газом [2–5]. В их число входят:

- сравнительный анализ материалов по одному из параметров: термостойкости, термохимической стойкости, каталитичности, температуре разрушения и т.п.

- отработка материалов тепловой защиты, определение их свойств;
- испытания элементов конструкций изделий РКТ, подверженных воздействию высоких тепловых нагрузок;
- отработка датчиков различных типов, предназначенных для измерений параметров в натуральных условиях;
- исследования процессов взаимодействия плазменных потоков с материалами;
- исследования закономерностей протекания процессов теплообмена и излучения с целью уточнения кинетических характеристик и валидации физико-химических и радиационных моделей высокотемпературного воздуха;
- спектральные исследования высокотемпературных газовых потоков, в том числе и при термохимическом разрушении ТЗМ.

В большинстве перечисленных типов экспериментов для их правильной интерпретации требуется проведение специальных методических испытаний по диагностике параметров плазменных струй. Поскольку не все параметры можно измерить непосредственно, для нахождения искомого параметра по совокупности измеренных используются достаточно сложные физико-химические модели и расчетные методики [6]. Например, энтальпия газа определяется по измеренному значению теплового потока. При этом используются программы решения уравнений Навье – Стокса.

Как правило, интерпретация полученных экспериментальных результатов по теплообмену или характеристикам многоразовых или уносимых материалов весьма сложна и также проводится с привлечением методов численного моделирования.

При численном моделировании течения в тракте установки с высокочастотным нагревом газа должна быть задана величина энергии, вкладываемая в плазму N_{pl} . Эта величина связана с количеством потребляемой энергии N , рассчитываемой по измеряемым величинам тока I (анодный + сеточный) и напряжения U .

$$N_{pl} = \eta^* \times N, \quad (1)$$

Величина η^* является коэффициентом полезного действия ВЧ плазмотрона, зависящим от многих факторов [7, 8]. Энерговклад в плазму N_{pl} зависит от индуцированных в плазме электромагнитных полей и ее проводимости, а также от рода газа и соотношения диаметров разрядной камеры D и глубины проникновения электромагнитного поля в плазму (толщины скин-слоя) $\Delta \sim \sqrt{1/\sigma\omega}$, где σ – проводимость плазмы, зависящая от рода газа, его температуры и давления, а ω – частота электромагнитного поля. Оптимальным отношением величин D и Δ , согласно [7], является $D/\Delta = 3.5$. В [7] показано, что при отклонении от этого условия в ту или иную сторону, удельная мощность падает – при меньших значениях из-за снижения количества поглощенной энергии (плазма становится прозрачной), а при больших – из-за выделения энергии в тонком скин-слое (при этом нагревается меньший объем газа).

Согласно данным, приведенным в [7, 8] величины, необходимые для оптимизации работы ВЧ плазмотрона определяются расчетным путем применительно к ВЧ плазмотронам работающим на аргоне при атмосферном давлении. В [7] обращено внимание на тот факт, что с уменьшением частоты генератора потери возрастают, и кпд ВЧ плазмотрона снижается.

Как показывают расчеты течения в разрядной камере ВЧ плазмотрона, выполненные на основе совместного решения уравнений Навье – Стокса, Максвелла [9, 10], оно носит весьма сложный характер. Поэтому приведенные выше рассуждения носят только качественный характер, и вопрос о кпд ВЧ плазмотронов не теряет своей актуальности.

При решении технологических задач определяющим параметром является тепловой кпд установки с ВЧ плазмотроном, определяемый как

$$\eta = \frac{Gh}{N}$$

Здесь G – расход газа; h – его энтальпия. Величина $Q = Gh$ (размерность Вт) есть мощность плазменной струи, выходящей из разрядной камеры (или соплового блока). Отметим, что измеряемая величина мощности плазменной струи Q , определенная таким образом, не совпадает с долей энергии, вкладываемой в плазму N_{pl} . Это связано с тем, что при измерениях величины Q теплообменником не учитываются потери энергии за счет излучения плазмы из объема разрядной камеры, а также тепловые потери струи в разрядной камере и при прохождении газа через охлаждаемый водой сопловой блок. Кроме того, возможны потери энергии, связанные с рассеянием электромагнитной энергии.

Поэтому измеряемая величина $Q < N_{pl}$. Калориметрирование потерь в сопловом блоке показало их малую величину. Тепловые потери в разрядной камере и за счет излучения пока не поддаются измерениям.

Данные по измерениям КПД установок с ВЧ плазмотронами мегаваттной мощности отсутствуют.

2. Экспериментальное определение интегральных энергетических параметров в тракте установки с ВЧ-плазмотроном

В принципе, величина КПД может быть определена непосредственными измерениями пересчитанных выше потерь энергии (калориметрированием) в элементах установки. Однако такой путь весьма сложен. Наибольшие трудности вызывает определение потерь плазменного объема на излучение. Подробно вопрос о потерях и КПД ВЧ плазмотронов рассмотрен в [7, 8]. Измерения теплового КПД установки РВКЗ (Institute of Space Systems, Stuttgart Германия) с ВЧ плазмотроном мощностью 150 кВт проводились с помощью калориметра, изготовленного в виде воронки из меди, обвитой трубкой, по которой прокачивалась вода [11]. Мощность струи Q определялась по расходу воды, разнице температур на входе и выходе из трубки и измеренной температуре газа на выходе из калориметра. К сожалению, данных о КПД в цитируемой статье не содержится.

В данной работе описан способ измерений теплового КПД установки с ВЧ плазмотроном мощностью 1 МВт, основанный на непосредственном измерении мощности плазменной струи. Для этого было использован специальный теплообменник.

Конструкция теплообменника представляет собой параллелепипед размером $260 \times 260 \times 490$ мм. Состоит из 18 секций, в которые вварены по 8 трубок $\varnothing 10$ мм. Трубки секций сварены таким образом, что, наложив крест на крест три секции, обеспечивается полное перекрытие светового потока. Собранные таким образом все секции обеспечивают шестикратное перекрытие проходного сечения теплообменника. В каждой секции имеются входной и выходной каналы, в которые вварены трубки. Каналы секций соединены между собой коллекторами из труб $\varnothing 24 \times 2$. На входном и выходном патрубках установлены специальные разъемы, на которых с помощью грибового уплотнения устанавливаются термопары. Термопары собраны по дифференциальной схеме и позволяют определять разность температуры воды между входом и выходом из теплообменника. На коллекторах предусмотрены ниппельные заглушки, обеспечивающие стравливание воздуха из системы. Подача воды в теплообменник осуществляется через гибкие шланги и стыковочные ниппельные разъемы с резьбой М 30 \times 1.5. Теплообменник устанавливается по оси рабочей камеры с минимальным зазором от сопла. Во входной водоохлаждающей магистрали установлен датчик давления, а в выходной – расходомер. Общий вид теплообменника показан на рис. 1.

На рис. 2 показано расположение этого устройства пристыкованного к сопловому блоку в рабочей части установки.

Для контроля температуры газа, выходящего из теплообменника, в его выходном сечении были установлены хромель-алюмелевая термопара с диаметром спая $\sim 0.3 \div 0.4$ мм и медный калориметрический датчик диаметром и высотой 3 мм с хромель-алюмелевой термопарой.

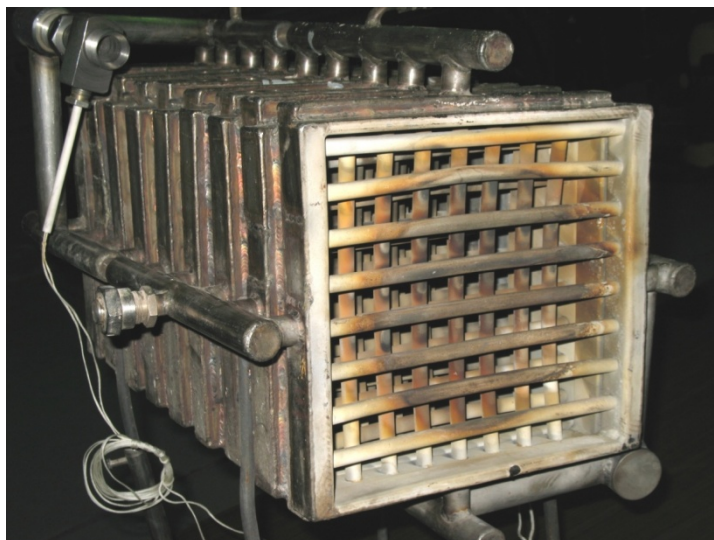


Рис. 1. Теплообменник для измерений мощности плазменной струи (вид со стороны входа в него плазменного потока)

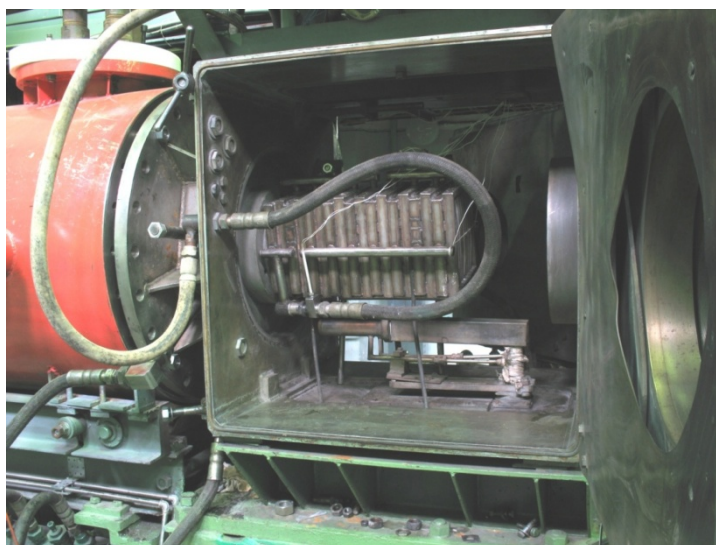


Рис. 2. Теплообменник в рабочей части установки

Были проведены эксперименты с четырьмя плазмообразующими газами (аргон, азот, воздух, углекислый газ) в широких диапазонах давлений ($p = 10 \div 200$ гПа) и энерговкладов ($N = 50 \div 300$ кВт).

Расход газа измерялся цифровым расходомером, снабжённым устройством управления расходом F 206A1-AAD-44-V. Давление в разрядной камере измерялось мембранно-емкостным манометром для измерения абсолютного давления MKS Baratron 626AX13MDE.

Дополнительно к измерениям мощности плазменных струй проводились исследования границ существования разряда в различных газах в зависимости от давления газа при фиксированном расходе ($G \approx 5$ г/с) одинаковом для всех газов. В этих экспериментах вблизи минимального значения N уменьшалось напряжение U на индукторе до погасания разряда. Это значение фиксировалось.

Условия проведенных экспериментов приведены в табл. 2.1–2.4.

На рис. 3–5 приведены измеренные значения мощности Q (кВт) (рис. 3), КПД (рис. 4) и температур газа, измеренных термопарой (T_1) и калориметром (T_2) (рис. 5) при работе ВЧ плазмотрона на аргоне.

Таблица 2.1

Условия экспериментов, проведенных при определении интегральных энергетических параметров в тракте установки с ВЧ плазмотроном и лучистых тепловых потоков в аргоне

№ эксп.	Плазмо-образующий газ	Расход плазмо-образующего газа	Давление в раб. части, гПа	Напряжение на генераторе, кВ	Ток генератора, А	Время эксперимента, с
4175	Аргон	5.09	6.89	2.25	22	100
4176	Аргон	5.09	7.24	3.01	33	126
4177	Аргон	5.45	7.36	3.69	41	110
4178	Аргон	5.41	24.8	2.25	22	100
4179	Аргон	5.06	49.4	2.25	22	124
4180	Аргон	5.31	49.3	4.18	48	115
4181	Аргон	5.3	7.2	4.18	48	117
4182	Аргон	5.25	7.02	4.94	60.9	100
4183	Аргон	5.4	24.9	3.01	33	107
4184	Аргон	5.4	24.7	9.69	41	129
4185	Аргон	5.37	25.02	4.18	48	110
4186	Аргон	5.5	25.1	4.94	60.9	111
4187	Аргон	5.26	50.05	3.01	33	140
4188	Аргон	4.87	50.08	3.69	33	124
4189	Аргон	5.06	49.68	4.18	48	115
4190	Аргон	5.26	49.65	4.94	60.9	98
4191	Аргон	5.13	99.32	2.25	22	160
4192	Аргон	5.27	99.06	3.01	33	85
4193	Аргон	5.21	99.52	3.69	41	111
4194	Аргон	5.29	99.21	4.18	48	108
4195	Аргон	5.24	99.41	4.94	60.9	100
4196	Аргон	5.15	203.5	2.25	22	114
4197	Аргон	5.33	198.02	3.01	33	109
4198	Аргон	5.18	138.18	3.69	41	98
4199	Аргон	5.27	200.96	4.18	48	110
4200	Аргон	5.14	201.31	4.94	60.9	107

Таблица 2.2

Условия экспериментов, проведенных при определении интегральных энергетических параметров в тракте установки с ВЧ плазмотроном и лучистых тепловых потоков в азоте

№ эксп.	Плазмо-образующий газ	Расход плазмо-образующего газа	Давление в раб. части, гПа	Напряжение на генераторе, кВ	Ток генератора, А	Время эксперимента, с
4167	Азот	5.13	9.58	2.24	22	125
4168	Азот	5.18	10.02	3.01	33	100
4169	Азот	5.08	9.97	3.69	41	109
4170	Азот	4.9	9.73	4.18	48	79
4171	Азот	4.95	9.65	4.94	60.9	90
4172	Азот	5.08	24.65	2.25	22	100
7173	Азот	5.14	24.6	3.01	33	100
4174	Азот	5.05	24.25	3.69	41	106
4226	Азот	4.87	24.66	3.01	33	120
4227	Азот	5.19	24.9	4.94	60.9	98
4228	Азот	5.14	49.7	2.25	22	100
4229	Азот	5.1	49.7	3.01	33	102

Продолжение таблицы 2.2

№ эксп.	Плазмо-образующий газ	Расход плазмо-образующего газа	Давление в раб. части, гПа	Напряжение на генераторе, кВ	Ток генератора, А	Время эксперимента, с
4230	Азот	4.97	49.6	3.69	41	99
4231	Азот	5	49.7	4.18	48	105
4232	Азот	4.97	99.6	2.25	22	120
4233	Азот	5	99.4	3.01	33	100
4234	Азот	5.08	99.5	3.69	41	102
4235	Азот	5.02	99.8	4.18	48	110
4236	Азот	4.68	199.1	2.25	22	100
4237	Азот	5.1	200.3	3.01	33	98
4238	Азот	5	200.8	3.69	41	90
4239	Азот	5.07	52.0	4.118	48	115
4240	Азот	5.1	47.6	4.94	60.9	100

Таблица 2.3

Условия экспериментов, проведенных при определении интегральных энергетических параметров в тракте установки с ВЧ плазмотроном и лучистых тепловых потоков в воздухе

№ эксп.	Плазмо-образующий газ	Расход плазмо-образующего газа	Давление в раб. части, гПа	Напряжение на генераторе, кВ	Ток генератора, А	Время эксперимента, с
4140	Воздух	5.08	8.4	2.25	22	92
4141	Воздух	5.08	8.55	3.01	33	86
4142	Воздух	5.1	8.61	3.68	41	86
4143	Воздух	5.08	8.65	4.18	48	75
4144	Воздух	5.08	8.67	5.02	60	74
4145	Воздух	5.1	24.4	2.22	22	74
4146	Воздух	5.08	24.5	3.01	33	81
4147	Воздух	5.08	24.7	3.68	41	84
4148	Воздух	5.1	24.6	4.18	48	93
4149	Воздух	5.12	25	4.94	60.9	62
4150	Воздух	5.13	49.4	2.25	22	108
4151	Воздух	5.13	49.33	2.4	25	91
4152	Воздух	5.1	49.4	3.01	33	101
4153	Воздух	5.1	49.45	3.61	41	83
4154	Воздух	5.06	49.76	4.18	48	87
4155	Воздух	5.08	49.44	4.94	60.09	93
4156	Воздух	5.08	49.64	2.25	28	107
4157	Воздух	5.08	102.3	2.26	22	95
4158	Воздух	5.08	100.1	3.01	33	113
4159	Воздух	5.1	103.4	3.68	41	103
4160	Воздух	5.11	103.18	4.18	48	121
4161	Воздух	5.13	101.7	4.94	60.9	54
4162	Воздух	4.91	197.8	2.25	22	107
4163	Воздух	4.98	200	3.01	33	100
4164	Воздух	4.95	198.67	3.68	41	113
4165	Воздух	4.93	199.6	4.18	48	107
4166	Воздух	4.98	149.9	4.94	60	30

Таблица 2.4

Условия экспериментов, проведенных при определении интегральных энергетических параметров в тракте установки с ВЧ плазмотроном и лучистых тепловых потоков в углекислом газе

№ эксп.	Плазмо-образующий газ	Расход плазмо-образующего газа	Давление в раб. части, гПа	Напряжение на генераторе, кВ	Ток генератора, А	Время эксперимента, с
4201	CO ₂	5.12	6.49	2.25	22	84
4202	CO ₂	5.15	6.91	3.01	33	105
4203	CO ₂	5.12	7.22	3.69	41	85
4204	CO ₂	5.15	7.47	4.18	48	100
4205	CO ₂	5.18	7.92	4.94	60.9	105
4206	CO ₂	5.32	24.5	2.56	26	121
4207	CO ₂	5.1	24.71	3.01	33	120
4208	CO ₂	5.18	25.05	3.69	41	105
4209	CO ₂	5.18	24.79	4.18	48	112
4210	CO ₂	5.11	24.58	4.94	60.9	103
4211	CO ₂	5.2	49.6	2.58	25.6	107
4212	CO ₂	5.1	49.8	3.01	33	120
4213	CO ₂	5.3	50.1	3.69	41	130
4214	CO ₂	5.14	49.4	4.18	48	135
4215	CO ₂	5.12	49.7	4.94	60.9	119
4216	CO ₂	5.4	99.8	2.81	33	125
4217	CO ₂	5.2	99.5	3.01	33	119
4218	CO ₂	5.3	49.4	3.01	33	130
4219	CO ₂	5.3	99.7	3.69	41	113
4220	CO ₂	5.3	100.5	4.18	48	105
4221	CO ₂	5.1	199.4	3.16	22.8	127
4222	CO ₂	5.4	201.2	3.01	33	137
4223	CO ₂	5.16	201.6	3.68	41	122
4224	CO ₂	4.96	202.8	4.18	48	110

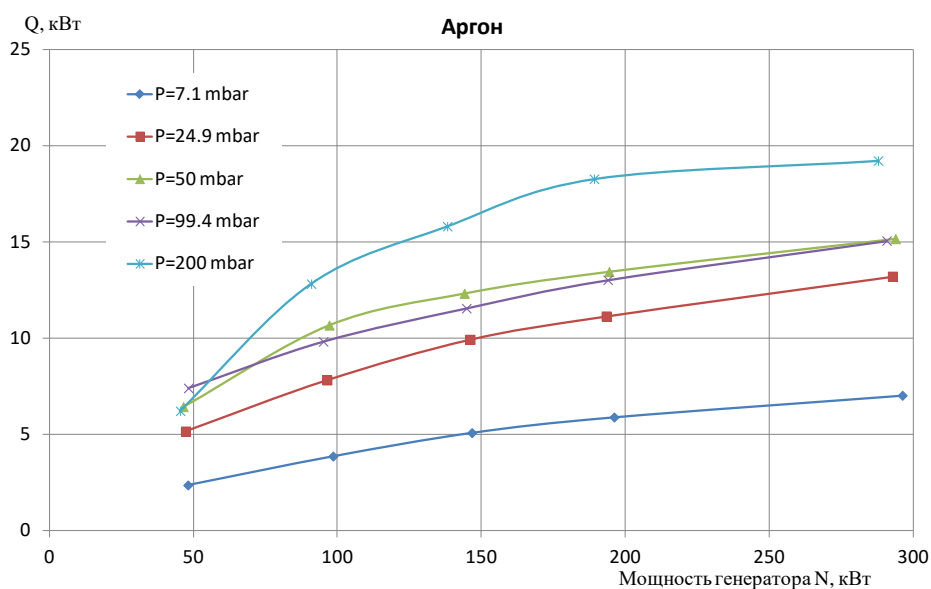


Рис. 3. Зависимость мощности плазменной струи аргона от энергозатрат при различных давлениях

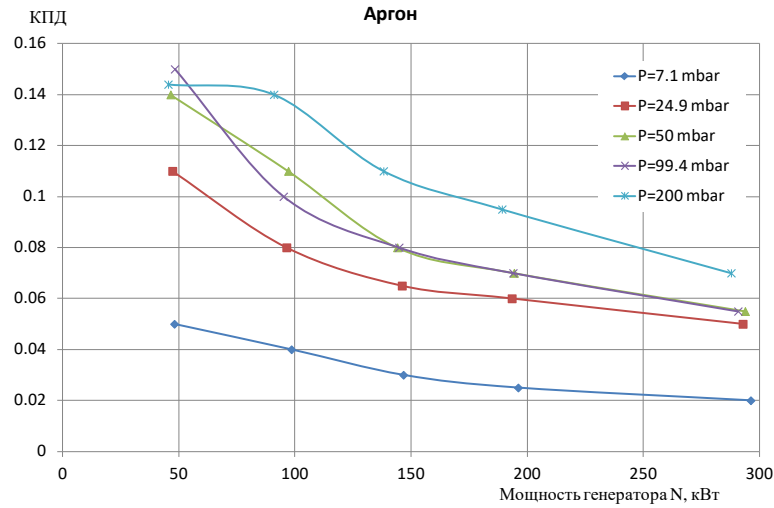


Рис. 4. Зависимость кпд плазменной струи аргона от энерговклада при различных давлениях

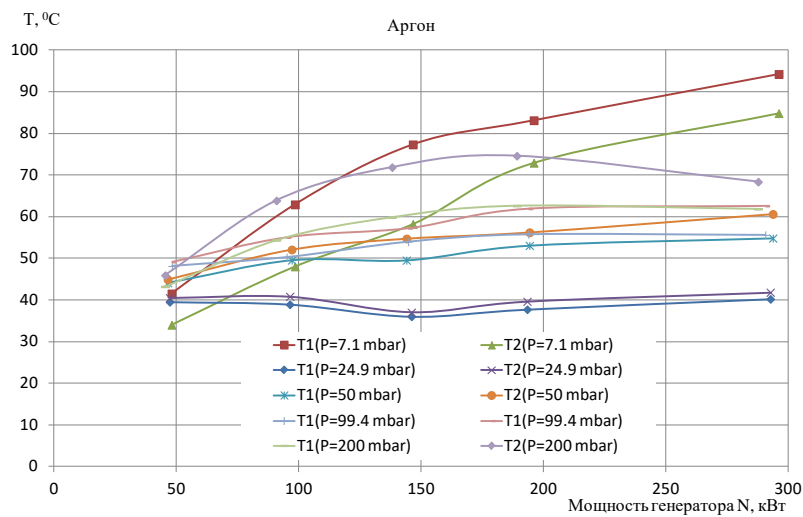


Рис. 5. Зависимость температуры газа на выходе из теплообменника от энерговклада при различных давлениях в аргоне

На рис. 6–8 приведены аналогичные данные для азота, на рис. 9–11 – для воздуха, на рис. 12–14 – для углекислого газа.

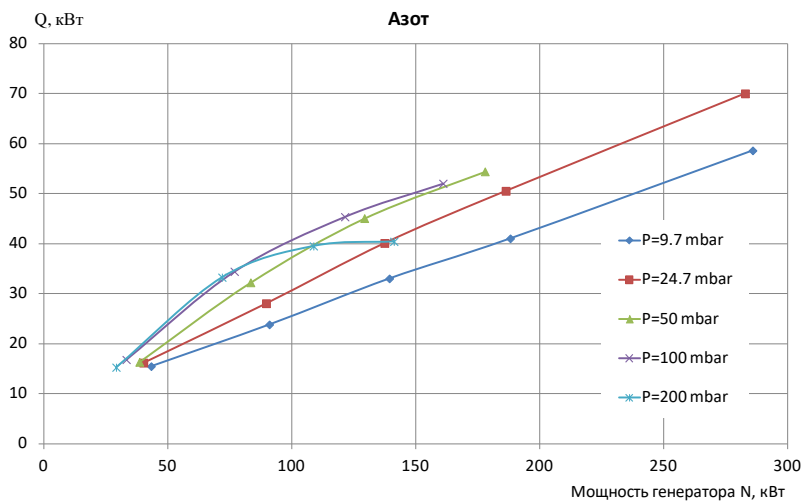


Рис. 6. Зависимость мощности плазменной струи азота от энерговклада при различных давлениях

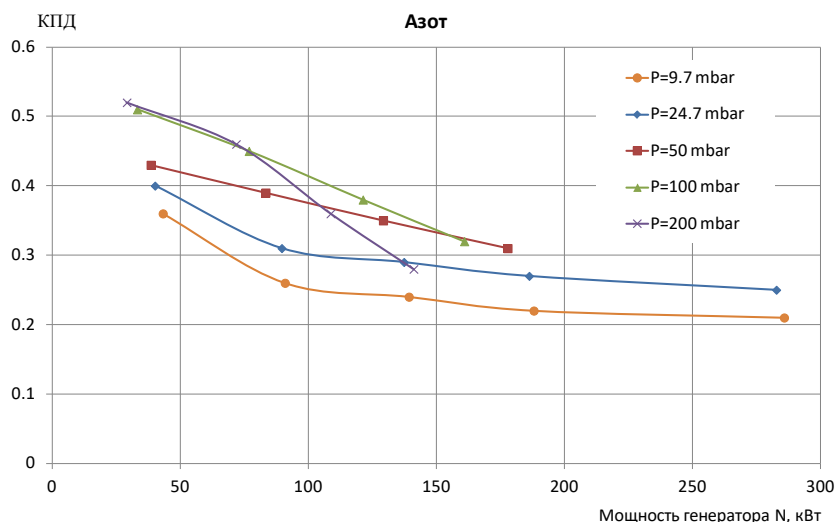


Рис. 7. Зависимость КПД плазменной струи азота от энерговклада при различных давлениях

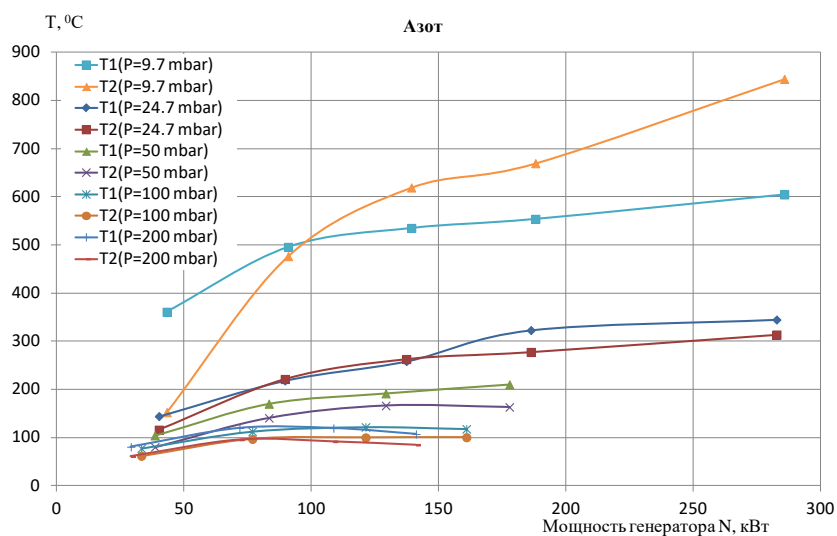


Рис. 8. Зависимость температуры газа на выходе из теплообменника от энерговклада при различных давлениях в азоте

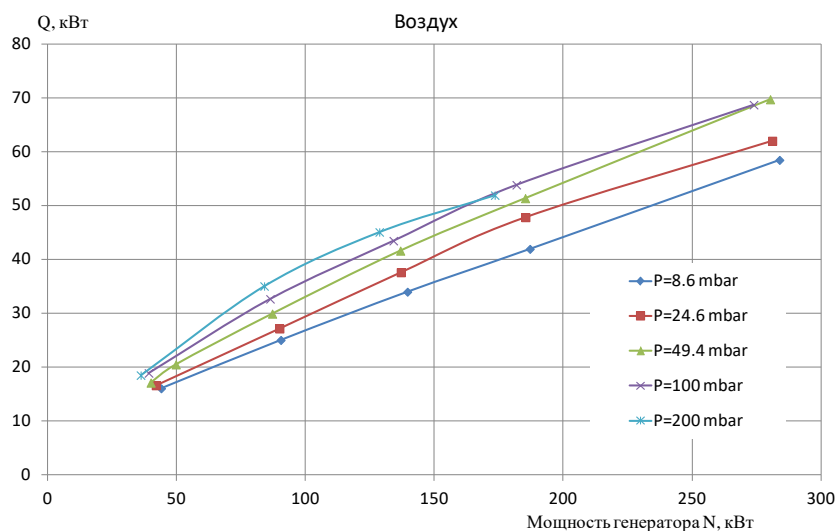


Рис. 9. Зависимость мощности плазменной струи воздуха от энерговклада при различных давлениях

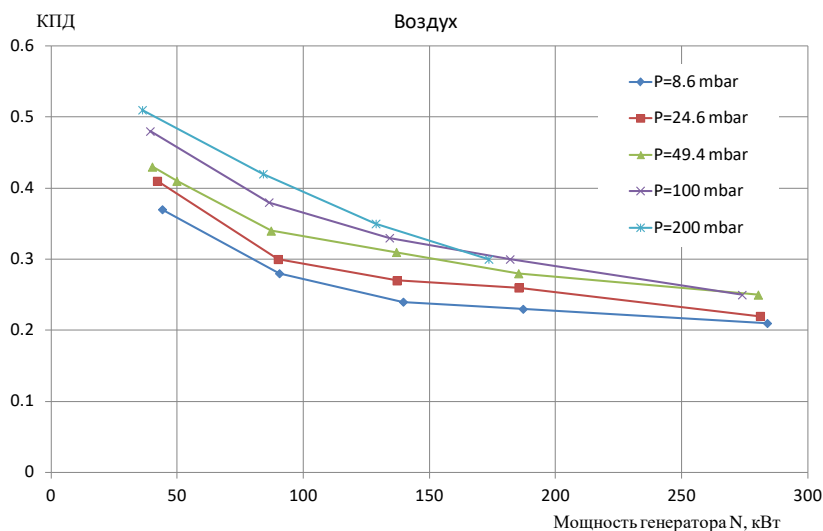


Рис. 10. Зависимость КПД плазменной струи воздуха от энерговклада при различных давлениях

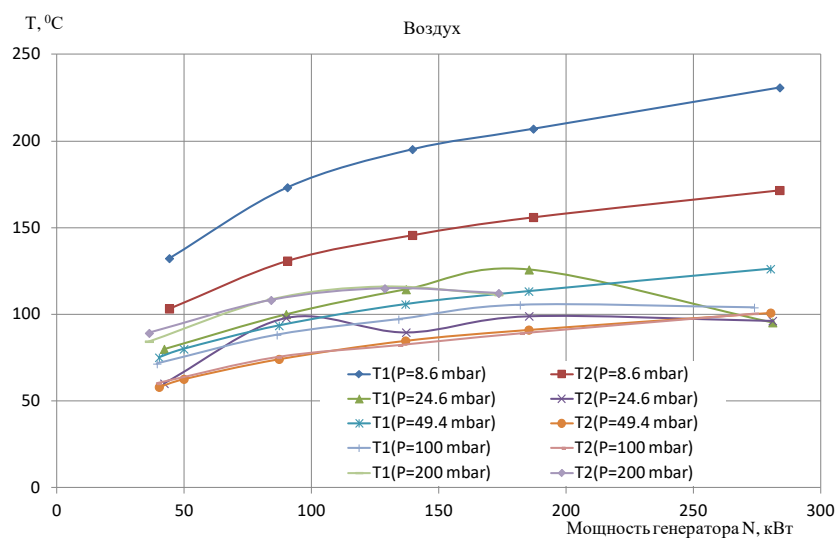


Рис. 11. Зависимость температуры газа на выходе из теплообменника от энерговклада при различных давлениях в воздухе

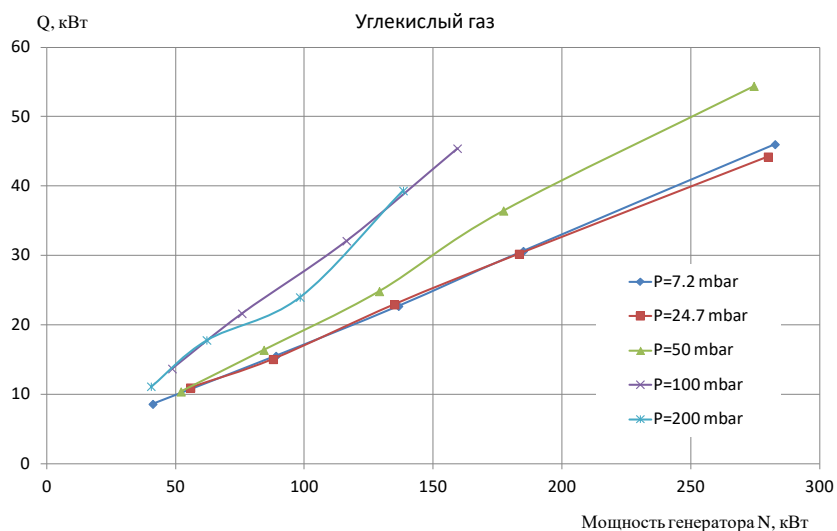


Рис. 12. Зависимость мощности плазменной струи углекислого газа от энерговклада при различных давлениях

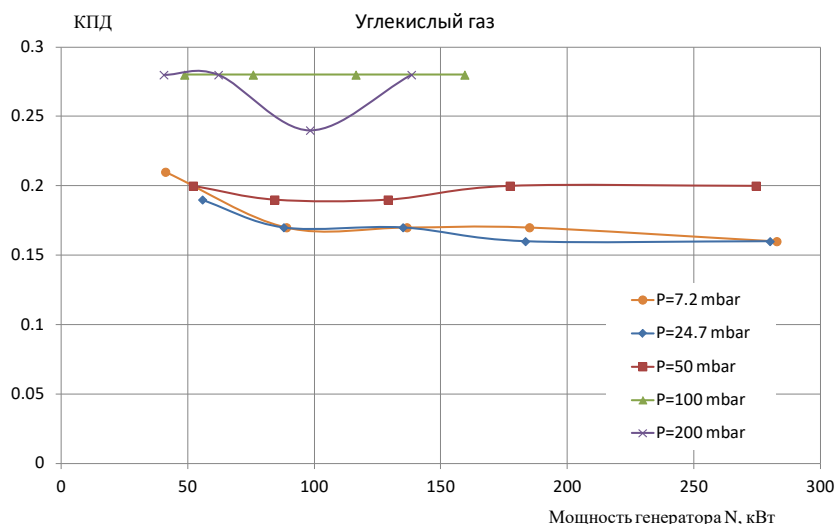


Рис. 13. Зависимость КПД плазменной струи углекислого газа от энерговклада при различных давлениях

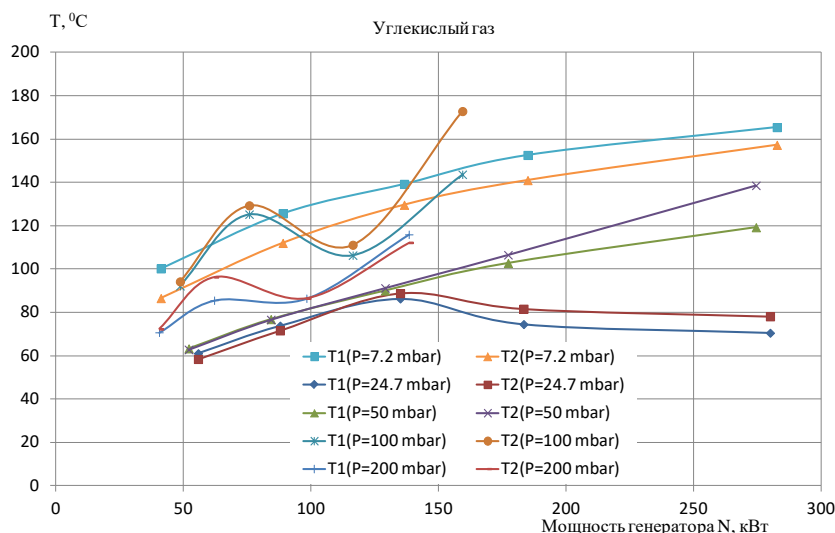


Рис. 14. Зависимость температуры газа на выходе из теплообменника от энерговклада при различных давлениях в углекислом газе

Анализ полученных данных показывает, что в разных газах измеренные значения величин Q и КПД сильно отличаются. Однако с увеличением давления во всех газах КПД возрастает, а с увеличением энерговклада уменьшается.

В аргоне с увеличением энерговклада величина Q изменяется нелинейно при всех значениях давления. Нелинейность возрастает с увеличением давления. Разброс значений Q при минимальном и максимальном значениях давления при $N > 100$ кВт превышает 3 раза. При минимальном значении $N = 50$ кВт (вблизи границы существования разряда) различие в значениях Q наблюдается только при давлениях $p < 50$ гПа.

В азоте при давлениях $p \approx 10$ и 25 гПа зависимость $Q(N)$ практически линейная во всем диапазоне $N = 50 \div 300$ кВт. С увеличением давления нелинейность возрастает, и при $p = 200$ гПа и $N \geq 100$ кВт величина Q близка к постоянной. Вблизи границы существования разряда значение Q от давления практически не зависит. Сама граница с увеличением давления смещается в сторону меньших значений энерговклада N . Максимальное различие в значениях Q наблюдается при $N = 100 \div 150$ кВт, но оно существенно меньше, чем в аргоне, и не превышает полутора раз.

В воздухе отклонение от линейной зависимости $Q(N)$ выражено слабее, чем в азоте. Заметное отклонение наблюдается только при давлении $p = 200$ гПа. Положение границы существования разряда при возрастании давления также смещается в сторону меньших значений энерговыклада N , но в меньшей степени, чем в азоте. Некоторая зависимость Q от давления вблизи границы сохраняется.

В углекислом газе при всех давлениях в исследуемом диапазоне (исключая небольшое отклонение при $p = 200$ гПа) наблюдается линейная зависимость $Q(N)$. Вблизи границы существования разряда величина Q от давления практически не зависит. Граница существования разряда в углекислом газе при расходе $G = 5$ г/с расположена около значения энерговыклада $N = 50$ кВт. Закономерности во влиянии давления на положение границы существования разряда не выявлено.

Коэффициент полезного действия (кпд), определен как $\eta = Q/N$ ($N = I \cdot U$). Зависимости кпд от энерговыклада N при работе ВЧ плазмотрона на разных газах приведены на рис. 4 для аргона, рис. 7 – азота, рис. 10 – воздуха, рис. 13 – углекислого газа.

В аргоне кпд достигает максимального значения $\eta \approx 0.15$ при высоких давлениях $p = 50 \div 200$ гПа и низких энерговыкладах $N = 50$ кВт. С увеличением энерговыклада кпд уменьшается.

Аналогично ведут себя зависимости кпд в азоте и воздухе. При малых энерговыкладах и высоком давлении кпд достигают 50 %, уменьшаясь по мере возрастания величины N .

В углекислом газе кпд в меньшей степени зависит от энерговыклада и начинает сильно возрастать при давлениях $p > 50$ гПа.

На некоторых режимах с высоким значением энерговыклада N при работе на молекулярных газах величину Q измерить не удалось, поскольку тепловые потоки к трубкам превышали допустимые значения.

Проведенные исследования показали, что кпд мегаваттного ВЧ плазмотрона при работе на четырех используемых плазмообразующих газах довольно низкий. Это может быть связано со многими причинами. В первую очередь согласно данным, приведенным в [7, 8], это трудности реализации оптимальных режимов работы ВЧ плазмотрона на различных газах в широком диапазоне давлений. Как следует из цитируемых книг, подбор и настройка электротехнических параметров ВЧ плазмотронов, как правило, проводятся в предположении работы устройства на аргоне при атмосферном давлении. При этом используются достаточно хорошо известные параметры аргоновой плазмы такие, как проводимость. Для оптимизации режимов работы ВЧ плазмотрона при переходе на другие плазмообразующие газы необходимо изменение параметров устройства согласования генератора и плазменной нагрузки, а иногда и диаметра разрядной камеры.

Отметим, что многолетний опыт эксплуатации установки с мегаваттным ВЧ плазмотроном при решении аэрофизических задач, показывает, что невысокие значения кпд не являются ограничением для выполнения широкой номенклатуры исследований.

Температура газа на выходе из теплообменника возрастает с уменьшением давления. Особенно сильно этот эффект проявляется в азоте. Температура на выходе из теплообменника при $p = 10$ гПа достигает 800 С. Это свидетельствует о том, что не вся энергия плазменной струи передается теплообменнику. При работе ВЧ плазмотрона на других плазмообразующих газах температура газа на выходе существенно ниже. Отметим, что даже при температуре газа на выходе из теплообменника $T \sim 1000$ К погрешность определения величины Q незначительна, поскольку $c_p T \ll H_0$.

При проведении экспериментов в потоках воздуха и азота наблюдалась интересная особенность. При давлении газа $p = 10$ гПа из теплообменника вытекал сильно светящийся газ. В воздухе свечение исчезало при давлении $p = 25$ гПа, а в азоте при $p = 50$ гПа. Это явление может быть связано с образованием в процессе интенсивной рекомбинации атомов (как гомогенной так и гетерогенной) электронно-возбужденных молекул и последующим их свечиванием.

Это показывает, что не все физико-химические процессы полностью релаксируют в используемом устройстве. К трудно контролируемым погрешностям измерений КПД (в сторону его занижения) с помощью теплообменника может приводить не полностью завершённая рекомбинация атомов. При этом атомы уносят значительную долю энергии газа в виде связанной энергии диссоциации.

Проведение расчетов для такой сложной конфигурации, которую представляет собой теплообменник, затруднительно. Поэтому ниже проведем оценки состояния газа на выходе из теплообменника. Рекомбинация атомов в теплообменнике протекает по двум механизмам: газофазному и гетерогенному. Эффективность этих механизмов определяется числами Дамкёллера по газофазной и гетерогенной реакциям рекомбинации атомов.

Для трехчастичной газофазной рекомбинации число Дамкёллера определяет отношение газодинамического времени $\tau_g = L/V$ к характерному времени реакции рекомбинации

$$\tau_{\text{хим}} = 1 / \left[k_r(T) \left(\frac{p}{RT} \right)^2 \right]$$

$$Da_g = \frac{L}{V} k_r(T) \left(\frac{p}{RT} \right)^2$$

Здесь L – длина канала; V – скорость газа; $k_r(T)$ – константа скорости трехчастичной рекомбинации. Течение газа близко к равновесному при условии $\tau_{\text{хим}} \ll \tau_g$, чему соответствует $Da_g \gg 1$.

В случае использования в качестве плазмообразующего газа чистого азота рекомбинация в газовой фазе идет в реакции с участием трех частиц $N + N + M \rightarrow N_2 + M$. Согласно литературным данным [12] ее константа скорости $k_r = 3.8 \times 10^{16} T^{-0.5} \text{ см}^6 / (\text{моль}^2 \text{ с})$.

На входе дозвукового потока в теплообменник из разрядной камеры основные параметры: температура, скорость, концентрация атомов имеют профили, близкие к параболическим. Однако при течении в теплообменнике с большим количеством поперечных трубок, газ можно считать хорошо перемешанным, что позволяет проводить оценки его состояния по среднемассовым значениям параметров.

В диапазоне давлений $p = 10 \div 200$ гПа и расходе газа $G \approx 5 \times 10^{-3}$ кг/с скорость газа на входе и выходе из теплообменника $V_{\text{вх}} \approx 200 \div 30$ м/с при $p = 10$ гПа и $V_{\text{вых}} \approx 30 \div 1$ м/с.

Числа Дамкёллера, рассчитанные по средним значениям плотности и температуры по длине теплообменника в приближении их линейного изменения, принимают значения: при $p = 10$ гПа $Da_g \approx 1$, при $p = 200$ гПа $Da_g \approx 10^3$.

При работе ВЧ плазмотрона на воздухе процесс релаксации газа в теплообменнике протекает в основном в быстрых обменных реакциях. Такой механизм применительно к условиям течения диссоциированного воздуха в пограничном слое описан в [13]. Число Дамкёллера, рассчитанное по константе скорости реакции $N + O_2 \rightarrow NO + O$, при всех давлениях на много порядков превышает 1 и поэтому этот процесс переводит атомы азота в молекулы существенно эффективней, чем рекомбинация в тройных соударениях, и теплосодержание плазменной струи быстро уменьшается.

При низком давлении газа в потоке, когда трехчастичная газофазная рекомбинация заморожена, эффективным процессом рекомбинации атомов являются гетерогенные реакции. В этом случае число Дамкёллера определяет отношение конкурирующих процессов массообмена и гетерогенной рекомбинации:

$$Da_w = \frac{K_w \rho_w}{\alpha / c_p}$$

Здесь K_w – константа скорости гетерогенной рекомбинации атомов; α / c_p – коэффициент теплообмена. На медных охлаждаемых трубках ($K_w \sim 10$ м/с [14]) процесс гетерогенной ре-

комбинации атомов достаточно эффективен. Кроме того, эффективность гетерогенной рекомбинации в теплообменнике возрастает за счет уменьшения коэффициента теплообмена при снижении скорости потока и многократного увеличения количества столкновений атомов с поперечно расположенными трубками.

Таким образом, проведенные оценки показывают, что исключая возможно режимы работы ВЧ-плазмотрона на азоте при давлениях $p \sim 10$ гПа, погрешности измерения значения Q , связанные с неполной отдачей энергии атомами, незначительны.

3. Определение КПД ВЧ плазмотрона по измерениям перепада полного и статического давлений

Физически этот способ основан на том, что измеряемая величина Δp связана со скоростью газового потока, которая зависит от энергозклада в плазму N_{pl} .

Величина p'_0 измерялась с помощью трубки полного напора. Это устройство представляет собой пустотелый охлаждаемый водой цилиндр диаметром $d = 2R_0 = 40$ мм с полусферическим носком и состоит из комбинации трубки полного напора и зонда статического давления. Статическое давление воспринимается двумя трубками с отверстиями, находящимися на диаметрально противоположных сторонах зонда, и усредняется ввиду соединения трубок при выходе из зонда. Оси трубок входных измерительных отверстий перпендикулярны к оси прибора. Через отверстие в центральной части сферического носка воспринимается полное давление в потоке. Диаметр трубок статического давления и полного давления равен $\sim 0.1d$. Модель представляет собой сварную конструкцию.

При проведении расчетов течения в разрядной камере контролируется величина энергозклада в плазму N_{pl} , тогда как регистрируемой в экспериментах величиной является потребляемая мощность N . В этом случае обработка экспериментальных данных проводится не для каждого конкретного эксперимента, а для всей серии экспериментов при заданном значении давления и различных энергозкладах. КПД установки является дополнительной неизвестной функцией энергозклада.

На рис. 15 показаны зависимости экспериментально измеренных и расчетных величин температуры и разности полного и статического давлений газа на оси струи от регистрируемого энергозклада для режима работы установки при давлении $p = 100$ гПа.

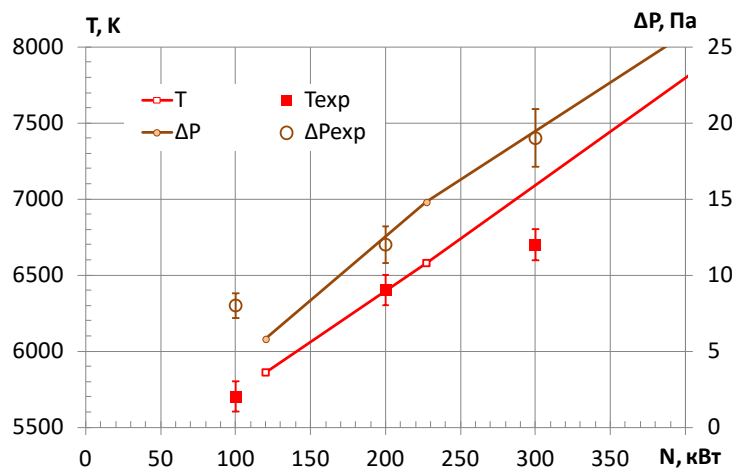


Рис. 15. Зависимость измеренных и расчетных величин температуры и разности полного и статического давлений газа на оси струи от энергозклада

На рис. 16 показаны зависимости от энергозклада измеренных и расчетных значений конвективного теплового потока к медному проточному калориметру и КПД установки. Следует отметить, что полного согласия результатов расчетов и экспериментально измеренных

величин при варьировании параметров добиться не удается. Это связано, как с погрешностью измерений, так и с возможной погрешностью расчетов. Лучшее согласие результатов получается при зависимости КПД установки от энерговклада, приведенной на рис. 16.

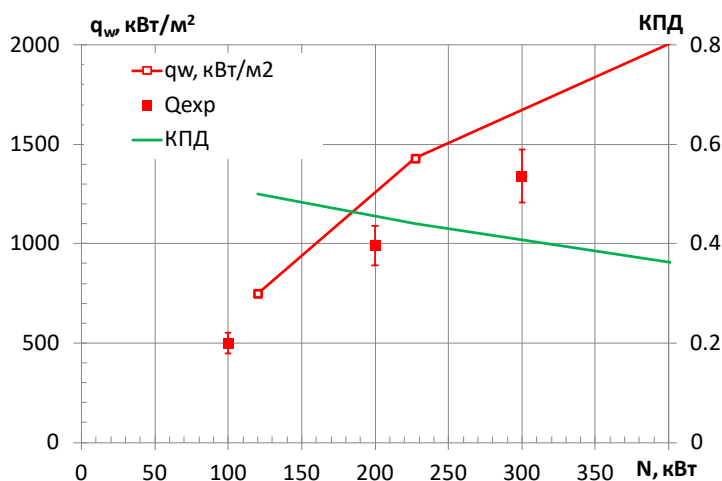


Рис. 16. Зависимость измеренных и расчетных величин конвективного теплового потока и КПД установки от энерговклада

Расчетная картина распределения температуры газа в разрядной камере и струе при $p=100$ гПа и $N=200$ кВт показана на рис. 17. На рис. 18 показано распределение температуры газа в струе при обтекании зонда плазменным потоком.

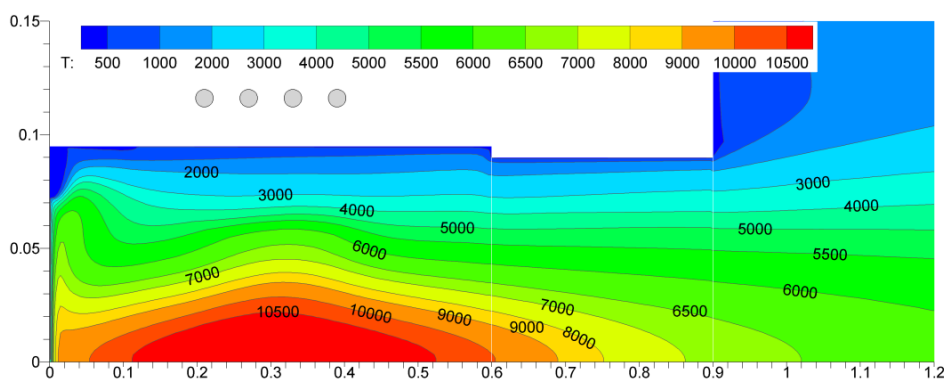


Рис. 17. Распределения температуры газа в разрядной камере и струе

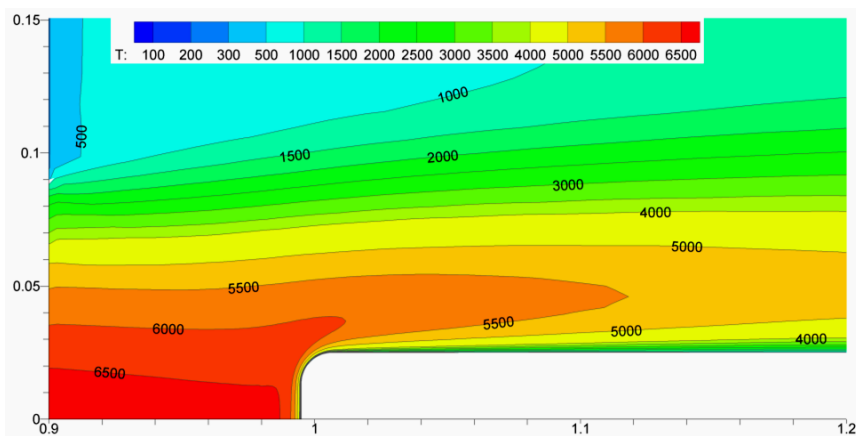


Рис. 18. Распределения температуры газа в струе и около модели

Таким образом, используя результаты экспериментальных измерений тепловых потоков в критической точке модели, разности полного и статического давления и температуры на оси струи, расчетным путем получаем полную картину течения газа в разрядной камере, струе и в окрестности модели. Расчетными параметрами, как в струе, так и в пограничном слое являются поля энтальпии торможения, температуры, плотности, скорости и концентрации всех компонент, включая электроны. Дополнительно определяется наиболее вероятное значение КПД.

Измеренный таким образом КПД также, как и при непосредственных измерениях (п. 2) уменьшается с увеличением энерговклада. При малых значениях N полученные разными способами значения КПД близки, однако, во втором случае его значение при высоких энерговкладах больше, чем в первом.

4. Измерения лучистых тепловых потоков в ВЧ плазмотроне

Датчик Гардона для измерений лучистых тепловых потоков показан на рис. 19.

Здесь используется тот же принцип, что и в датчике для измерений конвективного теплового потока [15]. Теплопринимающий элемент (ТВЭ) также представляет собой тонкий константановый диск, прикрепленный по периферии к медному корпусу. В центре диска приварен медный термоэлектрод. Для увеличения поглощения падающей лучистой энергии на поверхность ТВЭ наносится покрытие с высоким коэффициентом поглощения A (например, хром, имеющий величину $A \approx 0.85 \div 0.98$). Для устранения воздействия конвективного потока ТВЭ экранируется оптическим окном из сапфира. Лучистый тепловой поток, поступающий на ТВЭ через сапфировое окно, приводит к возникновению по радиусу диска градиента температуры, который преобразуется в термо ЭДС с помощью дифференциальной термопары. Величина термо ЭДС пропорциональна измеряемой величине лучистого потока.

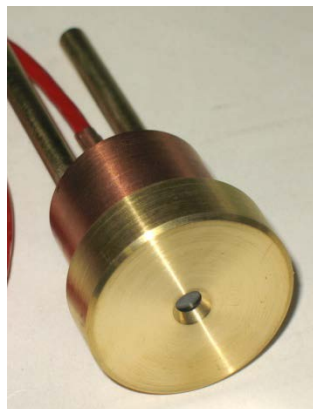


Рис. 19. Датчик Гардона для измерений лучистых тепловых потоков

При интерпретации экспериментальных данных необходимо анализировать спектральный состав падающего излучения, зависимость пропускания сапфирового окна и коэффициента поглощения покрытия ТВЭ от длины волны падающего излучения.

Было проведено две серии экспериментов. В первой серии (табл. 4.1) эксперименты проводились на тех же режимах работы установки, что и при измерениях конвективных тепловых потоков ($p = 10, 25, 100$ и 200 гПа и $N = 100, 200$ и 300 кВт). Модель с датчиком Гардона, корпус которого охлаждался проточной водой, с сапфировым окном, была расположена в рабочей части установки на расстоянии $L = 90$ мм от среза сопла (так же, как и при измерениях конвективного потока). Во второй серии экспериментов датчик Гардона для измерения лучистых потоков располагался в торце разрядной камеры. Во второй серии экспериментов на выходе из соплового блока в рабочую часть было пристыковано устройство для измерения теплосодержания плазменной струи.

Таблица 4.1

Условия проведенных экспериментов при измерениях лучистых тепловых потоков (серия №1)

№ эксп.	Давление в рабочей части $P_{\text{зад}}/P_{\text{изм}}$, гПа	I , А	U , кВ	Мощность $N_{\text{зад}}/N_{\text{изм}}$, кВт	G , г/сек	Время, с
3257	10/10.5	35.3	3.0	100/100.4	5.5 ÷ 5.7	76
3260	200/201.9	62.7	4.75	300/298.8	5.5 ÷ 5.7	135
3261	10/10.4	48.6	4.1	200/199.6	5.5 ÷ 5.7	140
3262	10/10.5	60.6	4.95	300/300.7	5.5 ÷ 5.7	90
3263	200/200.7	50.0	4.0	200/199.8	5.5 ÷ 5.7	103
3264	200/203	33.8	3.0	100/101.0	5.5 ÷ 5.7	160
3265	25/25.4	33.8	3.0	100/100.9	5.5 ÷ 5.7	101
3266	25/25.2	50.0	4.0	200/200.4	5.5 ÷ 5.7	200
3267	25/25.4	62.5	4.03	300/301.2	5.5 ÷ 5.7	205
3268	100/99.8	33.9	2.98	100/100.2	5.5 ÷ 5.7	85
3269	100/100.6	50.0	4.0	200/201.0	5.5 ÷ 5.7	81
3270	100/101.0	66.6	3.77	300/302.4	5.5 ÷ 5.7	158

Перед измерениями лучистого теплового потока с нижнего ввода вводился проточный калориметр. Полученные в этих экспериментах конвективные тепловые потоки приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Результаты измерений конвективных и лучистых тепловых потоков

№ эксп.	Мощность, кВт	Плотность теплового потока (проточный), кВт/м ²	Плотность лучистого теплового потока (датчик Гардона), кВт/м ²	Давление в рабочей части, гПа
3257	100.4	363	3.7	10.5
3260	298.8	1467.3	35.8	201.9
3261	199.6	585.3	7.6	10.4
3262	300.7	790.4	12.5	10.5
3263	199.8	957.3	24.3	200.7
3264	101.0	383.4	10.0	203
3265	100.9	424.7	4.8	25.4
3266	200.4	765.5	8.4	25.2
3267	301.2	1056.5	13.6	25.4
3268	100.2	507.1	7.9	99.8
3269	201.0	1001.5	14.8	100.6
3270	302.4	1377.2	20.9	101.0

На рис. 20 приведены зависимости лучистого потока от энерговлада при разных значениях давления газа в рабочей камере при работе ВЧ плазмотрона на воздухе.

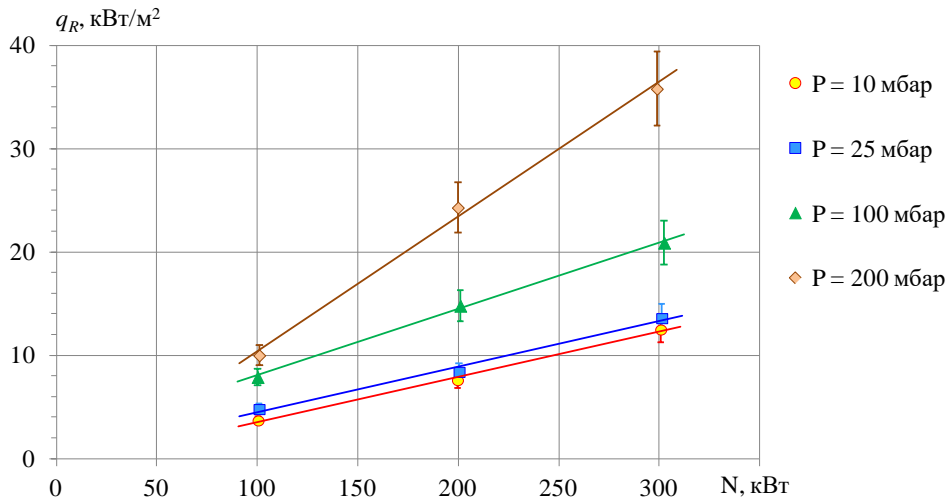


Рис. 20. Лучистые тепловые потоки к датчику Гардона на оси струи в зависимости от энерговыклада при различных давлениях газа (воздух)

Как следует из представленных данных, при всех давлениях лучистый тепловой поток линейно возрастает с увеличением энерговыклада. При низких давлениях $p=10$ и 25 гПа лучистые тепловые потоки близки по величине, а при увеличении давления существенно возрастают, оставаясь, однако существенно ниже конвективных.

Условия проведенных экспериментов при измерениях лучистых тепловых потоков во второй серии приведены в табл. 2.1–2.4.

На рис. 21–24 показаны результаты измерений лучистых потоков в различных газах датчиком Гардона с сапфировым окном, расположенным в торце разрядной камеры.

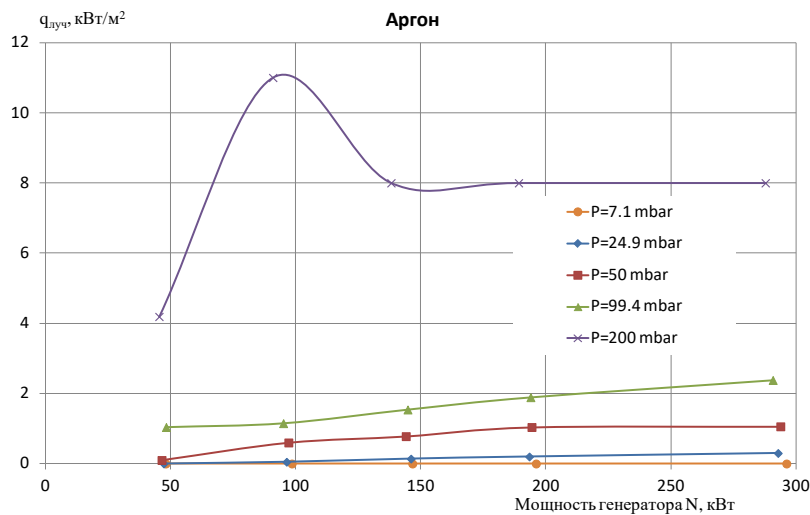


Рис. 21. Лучистые тепловые потоки в аргоне

Как следует из данных, приведенных на рис. 21–24, лучистые тепловые потоки во всех газах сильно возрастают с повышением давления. Наибольшее значение лучистого потока ($q_r = 100$ кВт/м²) достигается в углекислом газе при $p=200$ мбар и мощности $N=100$ кВт. Конвективный тепловой поток на таком режиме работы плазматрона к зонду, имеющему форму евростандарта, $q \approx 200 \div 400$ кВт/м². При таком соотношении лучистого и конвективного теплового потока эффект лучистого нагрева необходимо принимать во внимание при проведении исследований каталитической активности материалов в смесях газов, моделирующих атмосферу Марса.

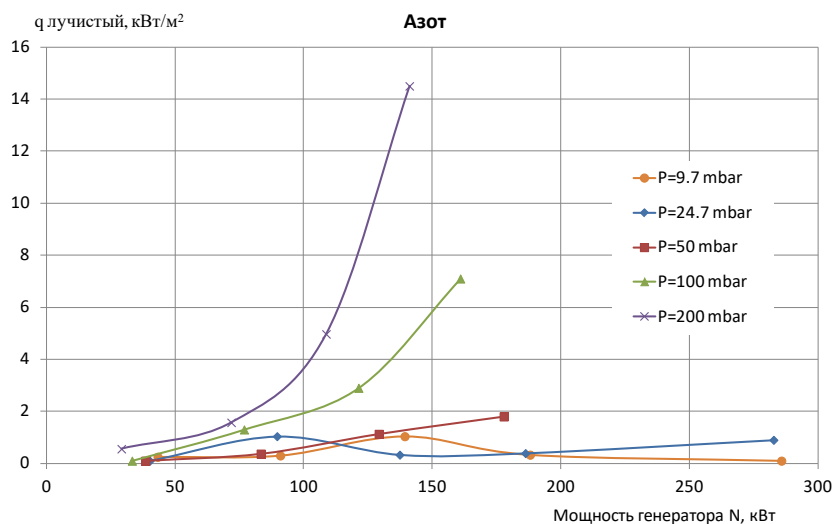


Рис. 22. Лучистые тепловые потоки в азоте

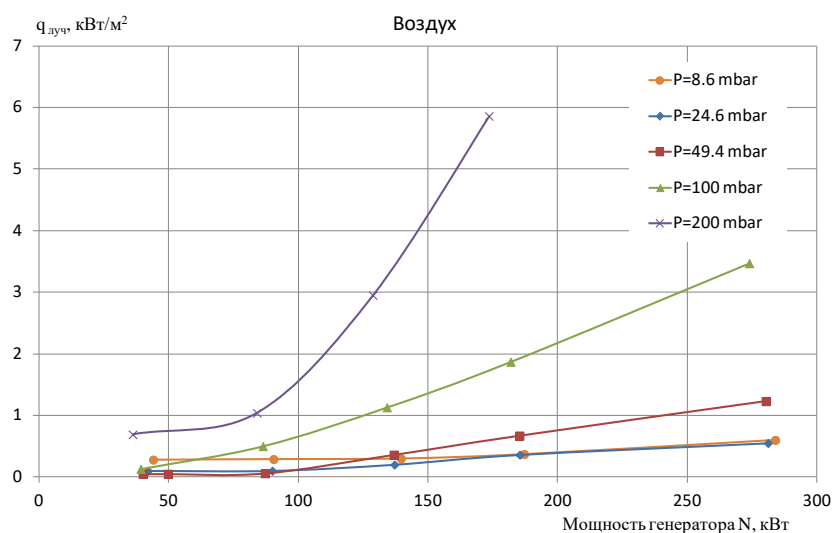


Рис. 23. Лучистые тепловые потоки в воздухе

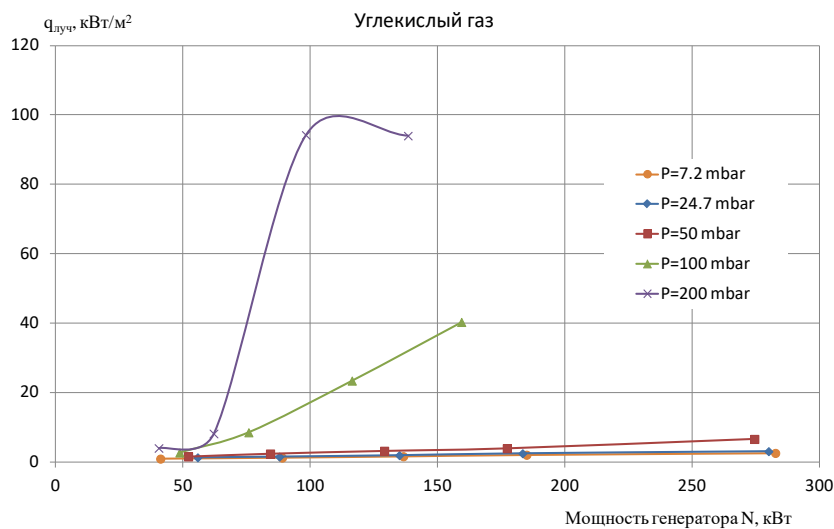


Рис. 24. Лучистые тепловые потоки в углекислом газе

Измерения лучистого теплового потока проводились также в ВЧ плазмотроне VKI в дозвуковых потоках воздуха и углекислого газа при расходе газа $G = 8 \text{ г/с}$ и давлениях в разрядной камере $p = 15$ и $p = 70 \text{ гПа}$ [5]. Измерения проводились датчиком Гардона с сапфировым окном, аналогичным используемому в настоящей работе, который был установлен на расстоянии $L = 447 \text{ мм}$ от выхода из разрядной камеры. Результаты измерений приведены на рис. 25 .

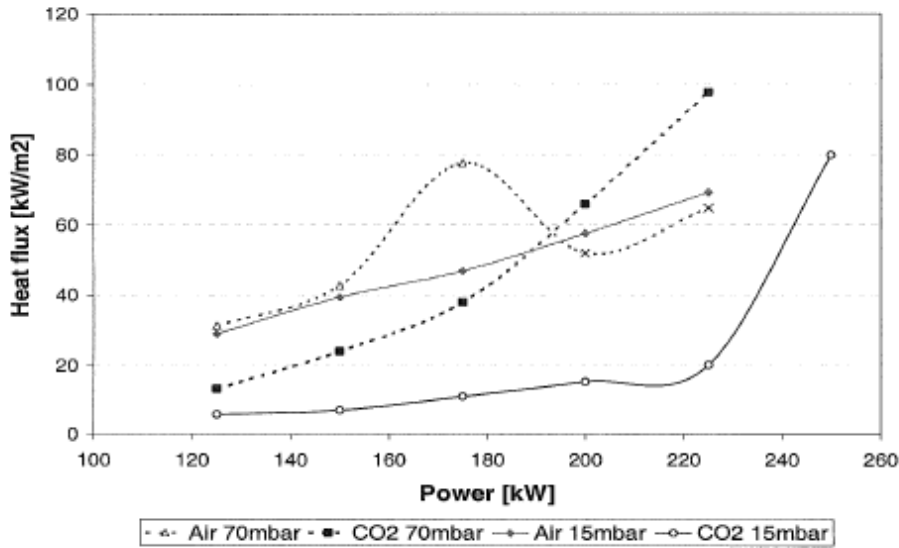


Рис. 25. Результаты измерений лучистых тепловых потоков в ВЧ-плазмотроне VKI [5]

Максимальные значения лучистых тепловых потоков ($q_r \sim 100 \text{ кВт/м}^2$) как в установке У-13ВЧП так и плазмотроне VKI зарегистрированы в углекислом газе. Значения q_r возрастают с увеличением давления и энерговклада. При работе ВЧ плазмотрона на аргоне и CO_2 на давлении $p = 200 \text{ гПа}$ в зависимости $q_r(N)$ наблюдается локальный максимум. Аналогичный локальный максимум наблюдается в плазмотроне VKI при работе на воздухе ($p = 70 \text{ гПа}$). Поскольку величина лучистого потока в значительной степени зависит от конструктивных особенностей установки, то детальное количественное сравнение величин q_r , измеренных в разных установках, вряд ли целесообразно. Можно лишь отметить, что в плазмотронах меньших размеров (и, соответственно, мощности) лучистые потоки и связанные с ними потери снижаются по сравнению с большими установками.

При увеличении энерговклада доля лучистой составляющей теплового потока возрастает. Это необходимо учитывать как при диагностике параметров плазменной струи, в частности определения энтальпии калориметрическим методом по измеряемому тепловому потоку к полусфере или евромодели, так и при определении каталитических свойств теплозащитных материалов (ТЗМ) [16]. Особенно сильно влияние этого фактора может проявляться при определении каталитической активности материалов в потоке смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2$, моделирующей атмосферу Марса.

При определении энтальпии торможения газа медным калориметрическим датчиком теплового потока он будет воспринимать суммарный (конвективный и лучистый) тепловой поток

$$q_{\text{изм}}^* = \frac{\alpha}{c_p} (H_0 - c_p T_w) + q_r (1 - R_1) = q_0 + q_r (1 - R_1) \quad (4.1)$$

Здесь α/c_p – коэффициент теплообмена; H_0 – энтальпия торможения; q_r – лучистая составляющая теплового потока (поток от газового объема); R_1 – коэффициент отражения света от поверхности датчика. Если поверхность датчика изготовлена из полированной меди и имеет

высокий коэффициент отражения R , то погрешность измерения энтальпии торможения, обусловленная этим эффектом будет незначительной.

В случае определения каталитичности ТЗМ, имеющих, как правило, высокую степень черноты ε (малые значения R), лучистый поток будет поглощаться поверхностью материала, вызывая его дополнительный нагрев. Суммарный (конвективный и лучистый) тепловой поток, падающий на поверхность материала в химически замороженном пограничном слое, будет

$$q_{изм} = \frac{\alpha}{c_p} \left(H_0 - c_p T_w - \frac{h_d}{1+Z} \right) + q_r (1 - R_2); \quad Z = \frac{K_w \rho_w}{\alpha / c_p} \quad (4.2)$$

Слагаемое $\frac{h_d}{1+Z}$ (h_d – энтальпия диссоциации) характеризует снижение теплового потока за счет конечной каталитичности поверхности может быть большим (до 3.5 раз при $Z \ll 1$).

Из (4.1) и (4.2) получаем выражение для K_w

$$K_w = \frac{q_{изм}^* - q_r (1 - R_1)}{(H_0 - c_p T_w) \rho_w} \left[\frac{h_d}{(H_0 - c_p T_w)} \frac{q_{изм}^* - q_r (1 - R_1)}{q_{изм}^* - q_{изм} - q_r (R_2 - R_1)} - 1 \right] \quad (4.3)$$

При выполнении условия $q_r \ll q_0$ $q_{изм}^* \rightarrow q_0$ и при больших энтальпиях $H_0 \gg c_p T_w$ (4.3) переходит в обычную формулу

$$K_w = \frac{q_0}{H_0 \rho_w} \left[\frac{h_d}{H_0 (1 - q^*)} - 1 \right],$$

где q^* – тепловой поток к образцу ТЗМ, отнесенный к q_0 .

При возрастании лучистой составляющей теплового потока погрешность определения K_w будет возрастать. При обычной процедуре расшифровки экспериментов и определения каталитичности дополнительный нагрев образца за счет лучистого потока приведет к завышению искомого параметра K_w .

Поэтому величин q_r должна быть измерена, а R_1 и R_2 – известны.

5. Заключение

1. Проведенные измерения мощности плазменных струй Q , генерируемых в мегаваттном ВЧ плазмотроне при использовании различных газов, показали следующее:

- величина Q растет с увеличением давления и энерговыклада во всех четырех газах;
- КПД (определенное, как $\eta = Q/N$) с увеличением давления во всех газах возрастает, а с увеличением энерговыклада уменьшается;
- вблизи границы существования разряда ($N \sim 50$ кВт) в молекулярных газах мощность плазменных струй слабо зависит от давления. В аргоне величина Q при давлениях $p < 25$ ГПа при его уменьшении снижается;
- в исследуемом диапазоне давлений $p = 10 \div 200$ ГПа и энерговыкладов $N = 50 \div 300$ кВт КПД в азоте и воздухе не превышает 50 %, а в аргоне и углекислом газе еще меньше.

2. Использование для определения КПД в потоке воздуха экспериментально-расчетной методики, основанной на измерениях конвективного теплового потока (калориметром), температуры газа (спектральным методом) и перепада полного и статического давления и численных расчетах течения в разрядной камере, струе и около зонда, в целом подтверждают результаты, полученные с использованием теплообменника.

3. В чистых молекулярных газах из-за не полностью завершённой рекомбинации атомов при течении газа в теплообменнике при низких давлениях ($p < 25$ гПа) некоторая доля энергии может уноситься в виде связанной энергии диссоциации. Это приводит к трудно контролируемым погрешностям измерений КПД (в сторону его занижения). В потоке воздуха рекомбинация атомов протекает в быстрых обменных реакциях и как показывают проделанные оценки, КПД определяется достаточно надёжно во всем исследуемом диапазоне параметров.

4. Многолетний опыт эксплуатации установки с мегаваттным ВЧ плазматроном при решении аэрофизических задач, показывает, что невысокие значения КПД не являются ограничением для выполнения широкой номенклатуры исследований.

5. Лучистые тепловые потоки от плазмы, находящейся в разрядной камере ВЧ плазматрона q_r , зависят от рода газа, возрастают с ростом давления и энерговыклада. В исследуемом диапазоне давлений и энерговыкладов в азоте и воздухе значения q_r , измеренные датчиком лучистого потока, расположенном в торце разрядной камеры, существенно ниже конвективной составляющей. В углекислом газе лучистая составляющая теплового потока может быть достаточно большой, что согласуется с данными, полученными в плазматроне VKI.

6. Измерения q_r в потоке воздуха датчиком, расположенным в рабочей части установки, показали большие значения. Это свидетельствует о существенном вкладе в лучистый поток излучения струи в рабочей части установки.

7. При высоких значениях q_r , вклад лучистого потока необходимо учитывать, как при определении энтальпии газа калориметрическим методом, так и при определении каталитических свойств ТЗМ.

Литература

1. Залогин Г.Н., Землянский Б.А., Кнотько В.Б. и др. Высокочастотный плазматрон – установка для исследований аэрофизических проблем с использованием высокоэнтальпийных газовых потоков // *Космонавтика и ракетостроение*. – 1994. № 2. С. 22–32.
2. Власов В.И., Залогин Г.Н., Землянский Б.А., Кнотько В.Б. О моделировании натуральных условий теплообмена в высокочастотном плазматроне материалов для теплозащиты гиперзвуковых летательных аппаратов // *Космонавтика и ракетостроение*. – 2001. № 23. С. 85–93.
3. 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.
4. Власов В.И., Залогин Г.Н., Ковалёв Р.В., Рудин Н.Ф., Тренёв М.Г. Условия моделирования теплообмена спускаемых аппаратов при скоростях входа $V = 10 \div 11$ км/с в плазменных струях ВЧ-плазматрона // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2011. Т. 12. <http://chemphys.edu.ru/issues/2011-12/articles/348/>
5. Carmona P.R. Investigation of Plasmatron Performance for Mars Entry // Von Karman Institute for Fluid Dynamics. Project Report 2003-30.
6. Власов В.И., Залогин Г.Н., Кнотько В.Б. Диагностика неравновесного плазменного потока высокочастотного индукционного плазматрона с применением двойного каталитического зонда // *Космонавтика и ракетостроение*. – 2000. № 19. С. 97–106.
7. Дресвин С.В., Бобров А.А., Лелёвкин В.М. и др. ВЧ- и СВЧ-плазматроны.– Новосибирск: Наука. Сиб. Отделение, 1992. – 319 с.
8. Рыкалин Н.Н., Сорокин Л.М. *Металлургические ВЧ-плазматроны: Электро- и газодинамика*. М.: Наука, 1987, 163 с.
9. Власов В.И. Теоретические исследования течения высокотемпературного газа в разрядной и рабочей камерах ВЧ-плазматрона // *Космонавтика и ракетостроение*. – 2001. № 23. С.18–26.

10. Власов В.И. Численное моделирование неравновесного течения в разрядной камере ВЧ-плазмотрона // *Фундаментальные проблемы высокоскоростных течений. Тез. докл. международной конф., ЦАГИ. 2004. С. 294–295.*
11. Massuti-Ballester B., Pidan S., Herdrich G., Fertig M. Recent catalysis measurements at IRS // *Advances in Space Research. Vol. 56, 2015, pp.742–765.*
12. Физико-химические процессы в газовой динамике. Компьютеризованный справочник в 3-х томах. Том 1. Динамика физико-химических процессов в газе и плазме. Под ред. Г.Г. Черного и С.А. Лосева. – М.: Изд. Моск. Ун-та. 1995, 350 с.
13. Воронкин В.Г., Залогин Г.Н. О механизме рекомбинации атомарного азота вблизи каталитической поверхности, обтекаемой диссоциированным воздухом // *Изв. АН СССР, МЖГ, № 3, 1980. С. 156–158.*
14. Брылкин Ю.В., Власов В.И., Залогин Г.Н., Кусов А.Л., Рудин Н.Ф. Экспериментальные исследования влияния структуры поверхности материалов на их каталитическую активность // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2015. Т. 16, вып. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-3/articles/600/>*
15. Датчики теплофизических и механических параметров: Справочник в трех томах. Т.1/ Под общ. ред. Ю.Н. Коптева. – М.: ИПРЖР, 1998. 458 с.
16. Zalogin G.N., Zemlyansky B.A., Knotko V.B., Rumynskyi A.N. Experimental Study of Different Thermal Protection Materials in Dissociated Carbon Dioxide Flow. Third European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles. ESTEC, Noordwijk, 1998.

Статья поступила в редакцию 20 декабря 2016 г.