

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

V. I. Alfeyorov, O. N. Vitkovskaya, A. P. Rudakova,
G. I. Shcherbakov, Исследование электродина-
мических характеристик МГД-ускорителя,
TVT, 1979, Volume 17, Issue 2, 400–408

<https://www.mathnet.ru/eng/tvt6603>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that
you have read and agreed to these terms of use

<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.174

May 13, 2025, 14:12:36



УДК 629.7.018.1.533.6.071

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МГД-УСКОРИТЕЛЯ

*Алферов В. И., Витковская О. Н., Рудакова А. И.,
Щербаков Г. И.*

Приведены результаты экспериментальных исследований вольт-амперных характеристик разряда между электродами МГД-ускорителя, продольного краевого эффекта, напряжения Холла на различных участках ускорителя и т. п. Проведен численный анализ полученных результатов, выделены основные факторы, определяющие вид электродинамических характеристик МГД-ускорителя.

К настоящему времени разработан и успешно испытан ряд магнитогазодинамических (МГД) ускорителей для аэродинамических труб, предназначенных для моделирования полета тел с космическими скоростями [1–8]. Дальнейшее усовершенствование таких ускорителей, возможность надежного управления параметрами потока требует детальных данных о характере протекания в них различных физических процессов и в первую очередь об электродинамических явлениях. С этой точки зрения существенный интерес представляет выяснение вида вольт-амперной характеристики разряда, ее зависимости от различных условий, например, от расположения рассматриваемой пары электродов по длине ускорителя. Значительный интерес представляют также данные о проявлении эффекта Холла и ряде других факторов, сопутствующих протеканию тока в таких условиях. Все это в конечном счете определяет структуру и характеристики системы электропитания МГД-ускорителя и эффективность его работы.

К сожалению, в литературе известно мало экспериментальных данных по указанным вопросам [9–11].

Предлагаемая работа посвящена экспериментальному исследованию вольт-амперных характеристик разряда, краевых эффектов, напряжения Холла и т. д. При этом особое внимание уделялось вопросам надежности измерения напряжения в условиях МГД-канала.

Экспериментальная установка и методика проведения исследования. Экспериментальные исследования проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1, достаточно подробное описание дано в [7, 8]. При испытаниях использовались ускорители с секционированными электродами с расширяющимися каналами длиной $L=385$ мм различного сечения: $15 \cdot 10$, $15 \cdot 15$ мм² и $10 \cdot 15$, $10 \cdot 20$ мм² на входе и выходе соответственно. Суммарная длина электрода и изолятора (шаг секционирования) составляла 8 мм, т. е. параметр секционирования для первого канала $s/b \sim 0,8-0,53$, для второго — $s/b \sim 0,53-0,4$.

Магнит ускорителя обеспечивал создание равномерного магнитного поля в средней части ускорителя на длине $l \sim 230$ мм, резкое уменьшение магнитной индукции происходило на длине ~ 30 мм.

Исследования проводились в режиме холостого хода МГД-генератора (все электроды разомкнуты), в режиме ускорителя (питание подавалось

на 22 пары электродов) и в комбинированных режимах. В последнем случае питание подавалось на 14 пар электродов, а остальные либо были разомкнуты (режим холостого хода МГД-генератора), либо попарно замкнуты практически через нулевое сопротивление (режим короткозамкнутого МГД-генератора).

Питание электродов осуществлялось от трехфазного трансформатора, одна из обмоток которого набрана из 22 изолированных катушек, каждая из которых через выпрямитель, собранный по трехфазной мостовой схеме, и балластные сопротивления подсоединялась к соответствующей паре электродов. Это позволило иметь 22 независимых источника питания электродов ускорителя, э.д.с. источников питания составляла 360 В.

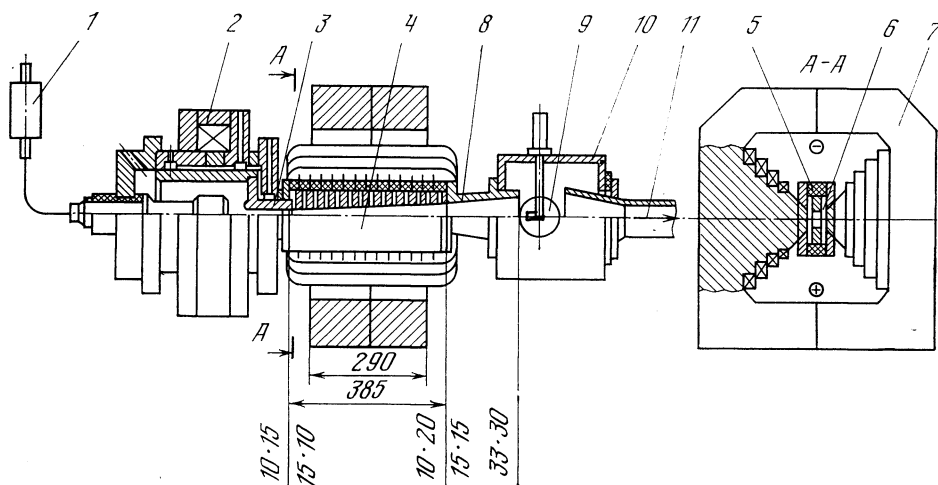


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — устройство для подачи присадки щелочного металла; 2 — электродуговой нагреватель; 3 — первичное сопло; 4 — камера МГД-ускорителя; 5 — электродные стенки; 6 — изоляционные стенки; 7 — электромагнит; 8 — вторичное сопло; 9 — насадок полного напора; 10 — камера Эйфеля; 11 — к выходному тракту. (Указано сечение тракта)

В процессе испытаний измерялись электрические параметры ускорителя: распределения по длине канала токов и напряжений на электродах, напряжения Холла на различных участках ускорителя и наведенной разности потенциалов. Напряжения измерялись с помощью делителя напряжений. Измеряемые величины регистрировались на осциллографах типа Н-010 и Н-105.

Для достаточно надежного определения электродинамических характеристик ускорителя следовало выяснить условия, обеспечивающие измерение напряжений с приемлемой погрешностью. Для этого проводилось измерение наведенной разности потенциалов, величина которой может быть строго рассчитана из магнитодинамических соображений. Измерения производились при помощи систем с внутренним сопротивлением $R_{вн} = 2,5$ кОм и 1—2,5 мОм на ускорителе, специально подготовленном для этого (стенки канала не загрязнены какими-либо проводящими слоями, гладкие с аэродинамической точки зрения). Результаты измерения показаны на рис. 2. Видно, что полученные значения отличаются приблизительно в два раза, причем значения, полученные прибором с $R_{вн} \sim 1$ мОм, строго соответствуют расчетным. Такое положение можно объяснить только тем, что внутреннее сопротивление межэлектродного промежутка в режиме холостого хода МГД-генератора сравнимо с внутренним сопротивлением первого измеряющего прибора, т. е. весьма велико. Это связано с наличием холодных приэлектродных слоев.

Регистрируемое значение наведенного напряжения при повторении пусков на одном и том же ускорителе уменьшалось, хотя режимы установки практически не менялись. Аналогичное явление наблюдалось и во время пуска, причем в каждом последующем пуске это проявлялось раньше. Указанное снижение наведенного напряжения сопровождалось увеличивающимися по амплитуде пульсациями довольно высокой частоты (~ 500 Гц). Отмеченные особенности связаны с осаждением на стенках канала присадки щелочных металлов и образованием в связи с этим «паразитных» электрических цепей. Надежное удаление ее между пусками приводило к восстановлению регистрируемого значения наведенного напряжения до нормальной величины. Поэтому при проведении основных испытаний напряжения измерялись приборами с большим внутренним сопротивлением, на каждой секции проводилось не более двух пусков без очистки стенок канала от присадки. Кроме того, при измерении напряжения Холла принимались специальные меры, позволяющие исключить влияние возможной несимметричности потенциала электродных стенок ускорителя, в частности, из-за действующих напряжений между электродами.

Отметим, что при измерении напряжения на электродах, через которые протекает значительный ток ($I > 5$ А), требования к внутреннему сопротивлению приборов и к состоянию стенок канала могут быть ослаблены. В этом случае сопротивление разрядного промежутка резко уменьшается, а вместе с этим уменьшаются погрешности измерения напряжения, связанные с внутренним сопротивлением системы измерения и «отравлением» стенок присадкой. Среднеквадратичная погрешность измерения электрических характеристик ускорителя, включающая класс точности измерительной аппаратуры, точность расшифровки осциллограмм и т. д. составляла величину порядка $\pm 5\%$.

В процессе экспериментов помимо электрических параметров ускорителя измерялись распределение статического давления по длине канала ускорителя, расход газа и присадки, давление, ток и напряжение в подогревателе, давления на срезах сопла, в рабочей части и полное давление во вторичном соплом. Регистрация измеряемых параметров производилась на осциллографе Н-010 синхронно с регистрацией электрических величин.

Эксперимент проводился в следующем порядке. После выхода подогревателя на установившийся режим начиналась подача присадки, затем подавалось напряжение на электроды ускорителя в течение ~ 2 с, после чего отключалась подача присадки и после выдержки ~ 5 с отключался подогреватель. Включение магнитного поля и регистрирующей аппаратуры производилось до зажигания разряда в подогревателе. Общая продолжительность рабочего режима 20–25 с. На каждом режиме, определяемом параметрами источника проводящего газа и величиной балластных сопротивлений в цепях питания электродов ускорителя, производилось примерно десять пусков.

Результаты экспериментов. Испытания проводились при суммарном расходе газа (воздух + 1% эвтектики КNa) $G = 10^{-2}$ и $2 \cdot 10^{-2}$ кг/с и параметрах газа в подогревателе $T_0 \sim 3700$ К, $p_0 \sim 0,22$ и $0,44$ МПа. Число M на входе в канал ускорителя составляло 2.

При испытаниях изменялись магнитная индукция $B = 0 - 2,5$ Т и токи через электроды ускорителя изменением балластных сопротивлений ($R_0 = 2; 4; 6; 8$ Ом).

Типичные экспериментальные результаты, характеризующие зависимость напряжения разряда от тока для различных пар электродов, представлены на рис. 3. Видно, что при токах через электроды $I \geq 10$ А ($j_y > 8$ А/см²) вольт-амперная характеристика близка к горизонтальной прямой, т. е. напряжение разряда практически не зависит от тока. Такой вид вольт-амперной характеристики наблюдался во всех проведенных испытаниях.

Полученный вид вольт-амперных характеристик несколько отличается от приведенного в работе [9]. Согласно данным этой работы, вольт-амперные характеристики практически в том же диапазоне изменения токов являются возрастающими. К сожалению, в [9] недостаточно полно указаны условия, при которых были получены экспериментальные данные, что затрудняет детальное сравнение.

Заметим, что приведенные на рис. 3 зависимости не являются вольт-амперными характеристиками в строгом смысле этого понятия, согласно которому они должны отражать зависимость напряжения от тока при неизменных внешних условиях. В данном случае увеличение тока сопровождается увеличением статического давления, иллюстрацией чему служат опытные данные, представленные на рис. 4. Видно, что протекание

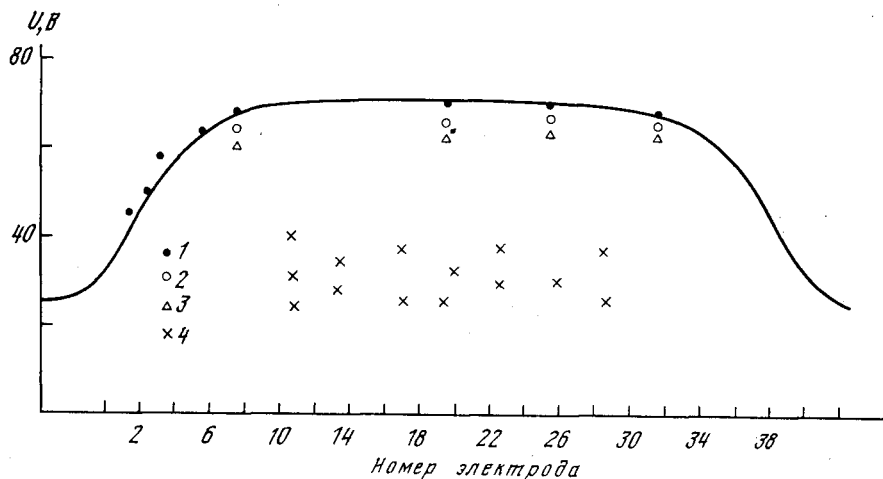


Рис. 2. Результаты измерения наведенного напряжения в режиме холостого хода: 1-3 - пуски №№ 1, 3 и 4 соответственно, внутреннее сопротивление прибора $R_{вн} = 1$ МОм; 4 - $R_{вн} = 2,5$ кОм, кривая - расчетное значение

тока в ускорителе приводит к изменению распределения давления по каналу ускорителя с образованием максимума в области первых запитанных электродов, причем интенсивность этого процесса зависит от величины токов. Приведенные на рис. 4 данные находятся в полном соответствии с ранее полученными на ускорителях с существенно отличным параметром фокусирования [8]. Можно считать, что отмеченные особенности являются характерными для МГД-ускорения потока газа в каналах подобной геометрии. Естественно предположить, что вместе с изменением давления в канале ускорителя происходит изменение статической температуры газа, скорости потока и т. д. Иными словами, выяснение процессов, определяющих вид вольт-амперной характеристики разряда в ускорителе, окажется невозможным без определения полной картины изменения газодинамических и термодинамических параметров среды. Подобный анализ будет проведен в следующем разделе.

На рис. 4 представлены также результаты измерения напряжения на запитанных электродах МГД-устройства (вне рабочего участка) при работе в режиме ускорения. На части электродов, непосредственно прилегающих к рабочим и расположенных в области равномерного магнитного поля, регистрируется напряжение больше величины, соответствующей наведенной разности потенциалов режима холостого хода МГД-генератора, т. е. имеет место отчетливое проявление продольных краевых эффектов. Заметное проявление этих эффектов наблюдается на длине двух-трех калибров. Отметим, что протяженности зон повышения давле-

ния и проявления краевых эффектов являются близкими. Наиболее отчетливо это заметно в области вверх по потоку от запитанного участка (см. рис. 4). По-видимому, повышение давления связано с джоулевым тепловыделением от токов, обусловленных продольными краевыми эффектами. Однако высказанное предположение требует более строгого обоснования.

Экспериментальные данные по напряжению Холла на различных участках МГД-канала представлены на рис. 5. Видно, что напряжение Холла оказывается независимым от величины токов на участке измерения. Это представляется несколько неожиданным, поскольку зависимость холлов-

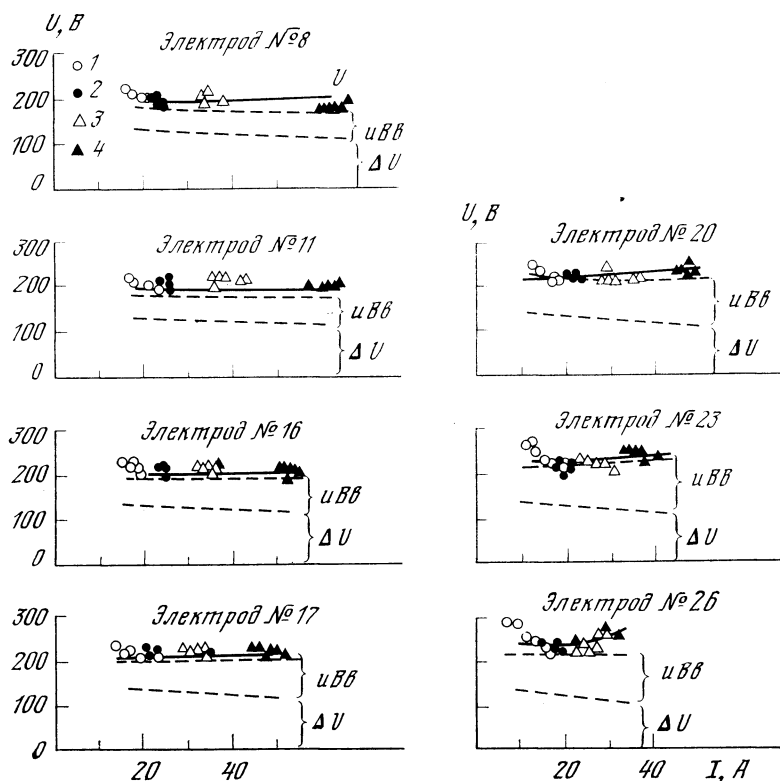


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики разряда: 1 — $R_0=7-8$ Ом; 2 — 6; 3 — 4; 4 — 2; линии — расчетные значения: ΔU — приэлектродного падения, $uВВ$ — противо-э.д.с., U — полного напряжения

ской составляющей напряженности электрического поля от плотности тока имеет вид

$$E_x = k j_y.$$

Видимо, влияние изменения тока на напряжение Холла компенсируется соответствующим изменением коэффициента k , который является функцией газодинамических и электрических параметров (свойств) проводящей плазмы. Таким образом, для анализа полученных результатов необходимо достаточно полные данные о параметрах движущейся плазмы.

В заключение остановимся на результатах испытаний в режимах МГД-генератора. В режиме короткозамкнутого генератора протекания токов обнаружено не было даже при достаточно большом магнитном поле $B \sim 2,5$ Т. В этом случае напряженность наведенного электрического поля составляла $uB \sim 50$ В/см, т. е. э.д.с. генератора в первом канале равна $\sim 50-60$ В, во втором ~ 75 , что является недостаточным для протекания заметных токов через МГД-канал (см. рис. 3).

Иная картина наблюдалась при комбинированных режимах. Так, например, когда группа в 14 пар электродов обеспечивала ускорение потока газа, а пять пар электродов, находящихся на расстоянии трех калибров вниз по потоку от первой группы, были короткозамкнуты, в цепях последних протекали токи, сравнимые по величине с токами на ускоряющем участке (см. рис. 6). Величина напряжения холостого хода на участке указанных пяти пар электродов оказалась также сравнимой с напряжением на ускорятельном участке. Изменение давления в области короткозамкнутых электродов имело тот же характер, что и в режиме ускорения, только возрастание давления по сравнению с незапитанным каналом оказалось значительно большим. При этом, согласно данным по давлению в

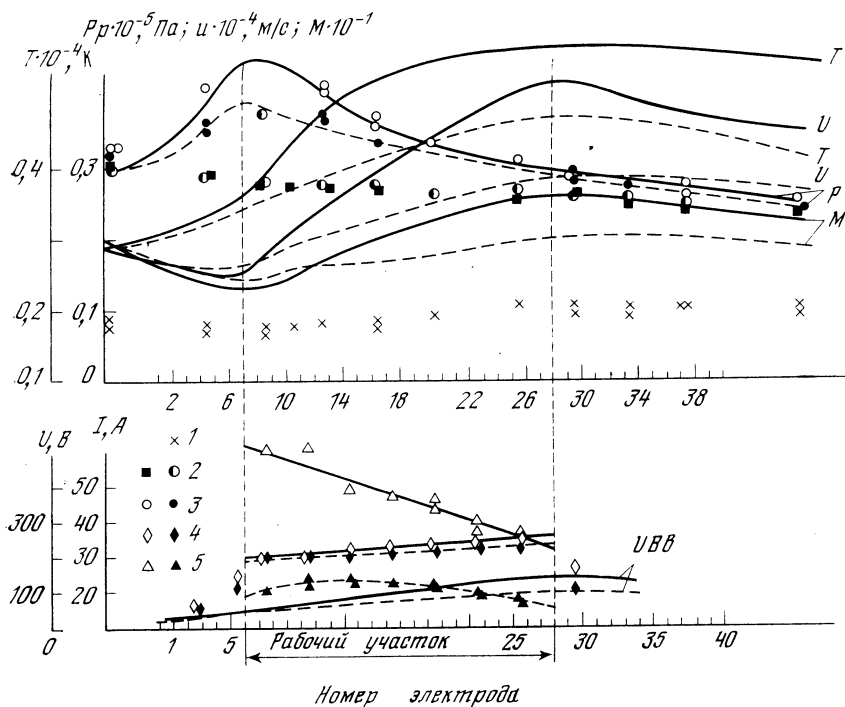


Рис. 4. Распределение параметров по длине ускорителя: 1–3 – статическое давление в канале; 1 – холодный поток; 2 – нагретый в подогревателе; 3 – при ускорении; 4 – напряжение; 5 – ток; линии – расчетные значения; светлые точки и сплошная линия относятся к случаю $R_6 \approx 2 \text{ Ом}$, темные и штриховая – $R_6 = 6 \text{ Ом}$

канале и во вторичном сопле, течение за короткозамкнутыми электродами остается сверхзвуковым, несмотря на столь большое увеличение статического давления. Отсюда следует, что устройства для восстановления давления, основанные на этом принципе (МГД-диффузоры), могут быть весьма эффективными. МГД-устройство с рассмотренной схемой включения электродов может оказаться также полезным для исследования различных процессов в весьма высокотемпературных МГД-генераторах, так как, несмотря на относительно малые размеры канала, удается получать режимы с высокими напряжениями и плотностями тока.

Обсуждение результатов. Для анализа полученных экспериментальных результатов использовалась методика, приведенная в работе [12] и основанная на решении так называемой «обратной» задачи для канала, когда определенные экспериментальным путем параметры или зависимости используются при решении системы магнитогазодинамических уравнений для определения недостающих данных. Как отмечалось выше, было проведено измерение распределения по длине канала ускорителя стати-

ческого давления, тока и напряжений. С использованием этих данных про водилось численное решение следующей системы квазидномерных урав нений:

$$\begin{aligned} \rho u \frac{du}{dx} &= -\frac{dp}{dx} + j_v B - \frac{f \rho u^2}{2D}, \\ \rho u^2 \frac{du}{dx} + \rho u \frac{dh}{dx} &= j_v E_v^* + j_x E_x - Q_w, \\ \rho u A &= G; \quad h = h(p, T); \\ j_v &= \frac{r\sigma}{1+\beta^2} (E_v - uB); \quad j_x = \frac{r-1}{r\beta} j_v; \\ E_x &= \frac{r(1+\beta^2)-1}{r\sigma\beta} j_v. \end{aligned}$$

Здесь f — коэффициент сопротивления канала; D — гидравлический диа метр; A — площадь поперечного сечения канала; Q_w — тепловой поток от

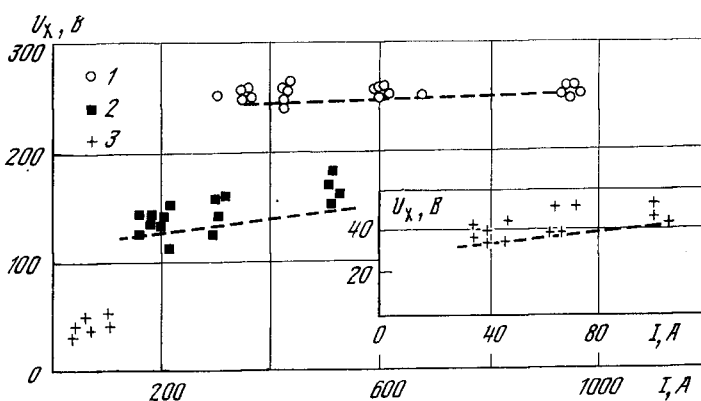


Рис. 5. Зависимость напряжения Холла от суммарного тока на участке между электродами: 1 — № 7 и 28; 2 — № 7–17; 3 — № 13–16; штриховые линии — расчетные значения

газа к стенкам канала, отнесенный к единице объема; r — коэффициент, учитывающий неравномерность протекания тока через электроды и зави сящий от параметра Холла β и степени секционирования s/b [13]. Остальные обозначения общепринятые.

Указанная система уравнений позволяет также оценить влияние и та ких факторов, как нагрев газа за счет джоулевой диссипации в приэлек тродных слоях, развитие неустойчивостей в плазме и др. В этом случае E_v^* имеет вид

$$E_v^* = E_v + \Delta U/b,$$

где ΔU — вольтов эквивалент потока тепла в газ, обусловленный падением напряжения в приэлектродных слоях, а вместо σ и β используются их эф фективные значения, определяемые согласно [14].

В качестве начальных условий использованы экспериментально изме ренные параметры на входе в МГД-канал (ρ_0, T_0, p, T, u).

Термодинамические функции и коэффициенты переноса для воздуха рассчитывались с помощью стандартизованной программы [15], равнове сная проводимость воздуха с присадкой — по методике [16]. Тепловой по ток в стенку канала рассчитывался через коэффициент трения, опреде ленный по гидравлическому сопротивлению канала. Коэффициент гидрав лического сопротивления находился путем решения той же самой системы

уравнений по экспериментально измеренному распределению статического давления по длине канала при работающем подогревателе без подачи питания на электроды ускорителя.

Надежность расчетных данных контролировалась совпадением рассчитанных и измеренных значений наведенной разности потенциалов на контрольных электродах, расположенных вниз по потоку от активной зоны и напряжения Холла на различных участках канала ускорителя.

Типичные результаты проведенных таким образом расчетов электрических и газодинамических характеристик приведены на рис. 3—5. Представленные данные позволяют выделить основные факты, определяющие вид электродинамических характеристик ускорителя.

Наиболее существенную часть разности потенциалов на электродах в рассматриваемых условиях составляет падение напряжения в приэлек-

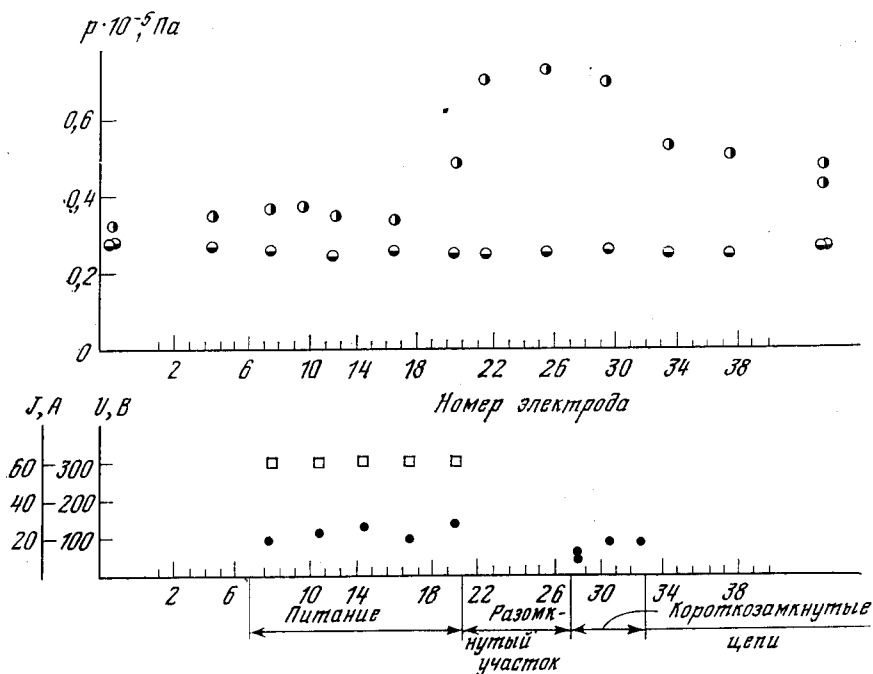


Рис. 6. Распределение измеряемых параметров при комбинированном режиме работы ускорителя: \square — напряжение; \bullet — ток

тродных слоях и наведенное напряжение uVb . Падение же напряжения, обусловленное сопротивлением проводящей среды столба разряда, оказалось незначительным. Это связано с тем, что межэлектродное расстояние мало, а электропроводность газа достаточно высока ($\sigma \approx 500-1200 \text{ См/м}$). Последнее определяется значительным разогревом газа, происходящим в основном из-за притока тепла за счет джоулевой диссипации в приэлектродных слоях.

Расчитанное значение приэлектродного падения напряжения ΔU хорошо согласуется с экспериментальными данными по зондовым измерениям, приведенными в работе [17], что служит косвенным подтверждением справедливости сделанных заключений. Однако для большей достоверности необходимо получение аналогичных результатов при относительно меньшем влиянии приэлектродного падения напряжения на рассматриваемые процессы. Это может быть достигнуто, например, за счет увеличения размеров (высоты b) канала и, отчасти, повышением температуры электродной стенки.

Результаты численного анализа влияния протекания токов на газодинамические и термодинамические параметры потока оказались весьма полезными для рассмотрения экспериментальных данных по напряжению Холла. Из выражения для холловской составляющей напряженности электрического поля следует, что она в основном определяется плотностью тока в канале и электропроводностью. Как видно на рис. 4, при увеличении токов в канале происходит рост статической температуры газа, а следовательно, и электропроводности. В рассматриваемом случае увеличение электропроводности оказывается пропорциональным току. Электронная концентрация n_e , определенная по измеренным значениям напряжения Холла, соответствует равновесным значениям для статических параметров газа в канале $T_{ст}$, $p_{ст}$.

Проведенные расчеты холловской составляющей электрического поля показали также, что эффекты, связанные с развитием ионизационной неустойчивости в плазме, влияние которой учитывалось введением эффективных значений проводимости $\sigma_{эф}$ и параметра Холла $\beta_{эф}$, в нашем случае несущественно или даже не имеет места. Рассчитанные с учетом эффективных параметров значения E_x оказались примерно вдвое меньше экспериментальных, в то время как рассчитанные без учета указанных эффектов хорошо согласуются с экспериментальными данными. Учет возможного развития этого типа неустойчивости не сказывается на характере изменения других рассчитываемых параметров, таких как E_y , $T_{ст}$ и т. д., что также может служить в пользу высказанных предположений.

Авторы выражают благодарность В. А. Плешакову и С. И. Тарасову за разработку систем измерения напряжения и помощь в проведении испытаний.

Москва

Поступила в редакцию
22 VII 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Леонард, Фэй. РТК, № 1, 1965.
2. Картер, Вуд, Макфарленд, Уивер. РТК, № 6, 1965.
3. Темпельмайер, Ритгенхауз, Вильсон. РТК, № 11, 1965.
4. J. Michard (ONERA) et J. Desimone (CGE). Entropic, № 29, 1969.
5. B. Berberich. BMBW—FBW 71—35.
6. Пэйт, Сайлер, Столинг, Вагнер. РТК, № 3, 1974.
7. В. И. Алферов, О. Н. Витковская, В. П. Рукавец, Г. И. Щербаков. Тез. докл. Всес. симп. по методам аэрофизических исследований. Новосибирск, 1976.
8. В. И. Алферов, О. Н. Витковская, В. П. Рукавец, Г. И. Щербаков. В сб. Электродуговые подогреватели газа. Тр. ЦАГИ, вып. 1949, 1978.
9. Ритгенхауз, Ворик. Прикладная магнитная гидро- и газодинамика. Тр. VI симп. по инженерным проблемам магнитной гидродинамики. Питтсбург, США, апрель 1965. «Наука», 1968.
10. Темпельмайер. РТК, № 4, 1966.
11. С. М. Апполонский, В. В. Евграфов, Ю. П. Коськин. Магнитная гидродинамика, № 1, 1969.
12. О. Н. Витковская, А. П. Рудакова. Ученые записки ЦАГИ, 5, № 4, 1974.
13. Селински, Фишер. РТК, № 3, 1966.
14. J. F. Louis. Proc of 3 th Int. Simp. on MHD Electr. Power Generation. SM 74/172. Salzburg, 1966.
15. М. Д. Здункевич, Р. М. Севастьянов. Труды ЦАГИ, вып. 1009, 1966.
16. М. Д. Здункевич, Р. М. Севастьянов, Р. А. Чернявская. Труды ЦАГИ, вып. 1010, 1966.
17. Рубин, Юстис. РТК, № 6, 1971.