

A 80  
17406

КОНТРОЛЬНЫЙ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ

на правах рукописи

Фомичев Владислав Павлович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКА ПЛАЗМЫ  
С ТЕМПЕРАТУРНОЙ ВОЛНОЙ В ДИСКОВОМ МЕД-КАНАЛЕ  
СИ.02.05 - механика жидкостей, газа и плазмы

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Новосибирск - 1980 г.

Работа выполнена в Институте теоретической и прикладной механики.

Н.Яненко

АН СССР Р.И.Солоухин

с.н.с. В.Г.Севастьяненко

соких температур АН СССР  
дании Специализированного

совета К003.22.01 по присуждению ученой степени кандидата наук в Институте теоретической и прикладной механики СО АН СССР, 630090, Новосибирск-90, ул. Институтская 4/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института теоретической и прикладной механики СО АН СССР.

Автореферат разослан " " "

1980 г.

Ученый секретарь специализированного совета К003.22.01, к.ф.-м.н.

*Григорьев* Ю.Н.Григорьев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время в нашей стране и за рубежом большое внимание уделяется решению проблемы прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. Одним из перспективных направлений решения этой проблемы является разработка МГД-генераторов (МГДГ), которые позволили бы осуществить МГД-преобразование энергии с к.п.д. более 50%. Характерным представителем генераторов открытого цикла с камерой сгорания в качестве теплового источника является созданная в ИВТ АН установка У-25. Результаты, полученные на ней, позволяют планировать создание к 1985-1990 гг. МГД-станций первого поколения, работающих на чистом топливе с к.п.д. не ниже 48-49%.

Сравнение двух режимов работы МГДГ со сплошным и слоистым потоками показывает, что использование слоистых потоков, в которых имеется чередование зон с повышенной и пониженной проводимостью, может повысить к.п.д. преобразования на 15-20% и довести его до 60%. Поэтому МГДГ со слоистым потоком в настоящее время следует считать перспективным, а проблему создания таких генераторов актуальной.

Составной частью этой проблемы являются вопросы, относящиеся к созданию экспериментальных установок для моделирования и изучения процессов, протекающих в МГД-генераторах. Сюда входит также задача получения слоистых потоков с заданными параметрами: величиной проводимости, толщиной слоев и частотой их следования. Решение названной задачи требует изучения возможных способов получения потоков плазмы с неоднородной проводимостью и умения применить тот или иной способ для реализации конкретной модели МГДГ.

Из известных в настоящее время источников плазменных потоков наиболее перспективными для экспериментальных установок являются плазмотроны. Поэтому изучение способов управления режимами работы плазмотронов имеет большое значение для решения названных выше задач.

Другим способом создания слоистой структуры потока в МГД-канале (МГДК) является реализация течения с Т-слоем, при котором слои с повышенной проводимостью в потоке развиваются вследствие нелинейных эффектов, сопровождающих взаимодействие плазмы с магнитным полем.

Приведенные в диссертации результаты получены при выполнении плана научных исследований ИТЭМ СО АН СССР по теме "Исследование МГД-процессов и связанных с ними вопросов магнитной газодинамики (шифр I.Ю.I.3, номер Государственной регистрации 76083824).

Целью настоящей работы является:

1. Экспериментально изучить управление мощностью дугового разряда в плазмотронах с высокочастотным сопровождением и с сопровождением постоянным током.

2. Экспериментально изучить управление мощностью плазмотронов с помощью дополнительных разрядов электродного (кондукционного и безэлектродного (индукционного)).

3. Изучить развитие локального возмущения температуры в потоке слабопроводящей плазмы в дисковом МГДК.

4. Экспериментально показать возможность инициирования слоистой структуры потока (течения с Т-слоем) в дисковом МГДК с помощью локального изохорического возмущения температуры.

## НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ

Исследования работы плазмотронов с высокочастотным сопровождением позволили объяснить механизм управления мощностью их с помощью изменения тока сопровождения и определить их пригодность для генерации слоистых потоков плазмы.

Для этих же целей могут быть использованы (и это показано в диссертации) дополнительные электрические разряды в потоке слабопроводящей плазмы.

Развитие изохорического возмущения температуры, полученного с помощью индукционного разряда на входе в дисковый МД-канал, приводит к возникновению в МДК слоистой структуры потока - течения с Т-слоем.

Экспериментальное изучение "подхвата", т.е. развития Т-слоя из локального изохорического возмущения температуры было впервые осуществлено в работе, явившейся основой для написания диссертации. Доказательство возможности "подхвата" имеет практическое и научное значение, т.к. открывает возможность для создания МДК, работающих на чистых газах без присадок щелочных металлов.

Апробация. Основные результаты диссертации докладывались на семинарах ИВТ АН, ЛенФТИ, ЛенВВМИУ, на Всесоюзном семинаре по ударным волнам, Москва 1980, на Всесоюзной конференции по низкотемпературной плазме, Киев, (1979).

Объем и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, двух глав и заключения, списка использованной литературы и рисунков. Объем текста 135 страниц, рисунков 81, список литературы 98 наименований. Во введении обосновывается необходимость проведения работы, явившейся основой при написании диссертации и формулируются основные цели этой работы.

В первой главе, в параграфах 1 и 2 описано эксперименталь-

ное исследование горения дугового разряда с высокочастотным сопровождением в плазмотронах с магнитной стабилизацией дуги. Эксперименты проводились на воздухе при давлении в плазмотроне от 0,3 до 1 атм, расходах воздуха 0,3-1 г/с и напряженности магнитного поля в зазоре между электродами 1400э. Анализ экспериментальных результатов позволил предложить модель воздействия ВЧ-тока с частотой 1 МГц на дуговой разряд и в рамках этой модели описать управление мощностью плазмотрона с помощью ВЧ-тока сопровождения.

Подключение ВЧ-тока к дуге постоянного тока может привести к появлению новых свойств дуги, связанных с переменностью тока во времени и наличием магнитного поля. В работе показано, что такие эффекты как:

1) скин-эффект, 2) анизотропия проводимости плазмы в присутствии магнитного поля, 3) наличие высокочастотной бесстолкновительной составляющей тока, 4) тепловая инерция дугового разряда, связанная с различными механизмами передачи тепла в столбе дуги, не оказывают заметного влияния на протекание разряда. В работе показано, что определяющее влияние ВЧ-тока ( $f = 1 \text{ МГц}$ ) заключается во введении в дуговой разряд дополнительной электрической мощности, величина которой определяется формулой

$$N_{\text{ВЧ}} = \frac{U_1}{I_1} \cdot I_c^2, \quad (1)$$

где  $U_1, I_1$  — величины напряжения и тока постоянной составляющей мощности,  $I_c$  — эффективное значение ВЧ-тока. Сопротивление дугового разряда является функцией полной электрической мощности плазмотрона.

При ВЧ-сопровождении полная мощность плазмотрона равна сумме  $N_0 = N_1 + N_2$ ,  $N_1 = U_1 \cdot I_1$ ,  $N_2 = \frac{U_1}{I_1} \cdot I_c^2$ . (2)

Наличие магнитного поля, используемого в плазмотронах для стабилизации дуги на аноде, также обуславливает зависимость  $R_d$  от  $I_c$ , но лишь в пределах  $5 \pm 10\%$  ее величины. Объясняется это тем, что при включении ВЧ-сопровождения тот же уровень мощности дуги достигается при меньшей величине постоянного тока, что в свою очередь приводит к уменьшению вращения дуги в магнитном поле и, следовательно, к уменьшению ее охлаждения. Из экспериментальных данных и анализа безразмерных вольтамперных характеристик коаксиальных плазмотронов, имеющих в работах других авторов, получено, что добавление к формуле (2) множителя

$$\left(\frac{I_0}{I_1}\right)^{0,3}$$

позволяет привести в соответствие зависимости сопротивления дуги от мощности без сопровождения и с ВЧ-сопровождением в коаксиальных плазмотронах (рис. 1, рис. 2)

$$N_0 = U_0 I_0 = (N_1 + N_2) \left(\frac{I_0}{I_1}\right)^{0,3} \quad (3)$$

Это свойство дуги постоянного тока, горящей с ВЧ-сопровождением, позволяет установить законы изменения тока и напряжения дуги (постоянных составляющих) при изменении тока сопровождения при квазистационарном режиме работы плазмотрона

$$U_0 = U_1 \left(1 + \frac{I_c^2}{I_1^2}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{I_0}{I_1}\right)^{0,15} \quad (4)$$

$$I_0 = I_1 \left(1 + \frac{I_c^2}{I_1^2}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{I_0}{I_1}\right)^{0,15}$$

В экспериментах зависимость (4) выполнялась с точностью измерений величин  $U_0, I_0, U_1, I_1, I_c$ .

Электрическая дуга, горящая с ВЧ-сопровождением, имеет ряд интересных для практического применения свойств:

1) несамостоятельное горение дуги с током в десятки ампер,

- 2) управление мощностью дуги, постоянного тока с помощью ВЧ-тока сопровождения,
- 3) возможность инициирования сильноточной дуги с помощью тока сопровождения,
- 4) увеличение устойчивости горения дуги при ВЧ-сопровождении.

Перечисленные свойства могут быть объяснены (и это сделано в диссертации в § 3,4) в рамках модели изложенной выше и, описываемой уравнениями (4). В частности, показано, что управление мощностью плазмотрона с помощью тока сопровождения может быть "ключевым", когда плавное изменение ВЧ-тока приводит к включению или выключению основного источника электрической мощности и непрерывным, когда плавное изменение ВЧ-тока сопровождается плавным же изменением основного тока. Кроме этого увеличение ВЧ-тока может приводить как к увеличению полной мощности плазмотрона, так и к уменьшению ее и это определяется соотношением между величинами сопротивления балласта,  $R_s$ , в цепи основного источника и  $R_d$  - сопротивлением дуги. Если  $R_d > R_s$ , то  $\frac{\partial N}{\partial I_c} > 0$ , если  $R_d < R_s$ , то  $\frac{\partial N}{\partial I_c} < 0$ .

В параграфе 5 рассмотрено управление мощностью плазмотрона с помощью дополнительного постоянного тока. Далее, в § 6 рассматриваются способы модулирования температуры плазменной струи, вытекающей из плазмотрона, с помощью электродного (кондукционного) и безэлектродного (индукционного) разрядов. Экспериментальное изучение электродного подогрева проводилось на плазмотроне осевой схемы с магнитной стабилизацией дуги на аноде. Для осуществления подогрева плазменной струи с помощью импульсного тока разряда конденсатора перед выходным электродом плазмотрона - анодом помещался дополнительный электрод, являющийся катодом. Усло-



вия эксперимента были следующие: расход воздуха через плазмотрон 0,3, 0,7, 1 г/с; давление на выходе плазмотрона 1 атм; мощность основного дугового разряда около 16кВА; напряжение на конденсаторе (150 мкФ) в цепи дополнительного подогрева было 400, 600, 800 и 1000 В. Время разряда менялось подключением индуктивностей в разрядную цепь от 200 мкс до 1200 мкс; напряженность магнитного поля в области анода 800Э. В экспериментах измерялись напряжение и ток основного разряда, напряжение и ток дополнительного разряда, температура плазменной струи на выходе из плазмотрона измерялась по отношению интенсивностей излучения линий меди с длинами волн 5106А и 5154А, кроме этого проводилось фотографирование вращения прианодного участка дуги в плоскости анода с помощью скоростной камеры СФР-1М.

Эксперименты показали, что в результате дополнительного разряда температура плазменной струи увеличивалась с 5000+6000°К до 10000+12000°К в зависимости от условий разряда. Сопротивление участка дуги, подверженного дополнительному разряду, уменьшалось более чем на порядок величины от первоначального значения. Анализ экспериментальных данных показал (рис. 3), что в области параметров, приведенных выше, и при времени нарастания тока до его максимального значения 100 мкс и 240 мкс изменение сопротивления связано с изменением тока соотношением

$$P_0 = 4,48 P_1^{0,71}$$

здесь:  $P_0 = \frac{U}{l} \epsilon_0 l$ ,  $P_1 = \frac{\rho_0 h_0 \epsilon_0 l V}{I^2 \tau_H}$

$\rho_0, \epsilon_0, h_0$  - масштабные значения плотности, электропроводности и энтальпии при температуре воздуха 10100°К и давлении 1 атм,

$l$  - длина участка дуги, подвергаемого дополнительному подогреву,

$\tau_H$  - время нарастания тока до максимального значения.

Далее, в § 7 анализируются условия разряда существующие при индукционном подогреве плазменной струи. Проведенные оценки показывают, что индукционный подогрев может быть осуществлен, если в начальный момент толщина скин-слоя, подсчитанная по частоте тока в индукционной катушке и начальному значению проводимости плазмы, примерно равна радиусу струи. Напряжение на индукторе определяется временем нагрева и величиной приращения температуры и может быть оценено исходя из простого предположения, что вся подводимая к индуктору электрическая мощность затрачивается на нагрев плазмы, находящейся в плазменном кольце с толщиной равной толщине скин-слоя, и длиной равной длине индуктора. При этом необходимо учитывать изменение толщины скин-слоя с изменением температуры плазмы. Процесс нагрева изохорический. Приблизительные расчеты, выполненные в этих предположениях, показали, что для нагрева аргоновой плазмы от температуры  $7000^{\circ}\text{K}$  до  $10000^{\circ}\text{K}$  необходимо подвести к плазменному кольцу сечением  $2 \times 2 \text{ см}$  и средним радиусом  $5 \text{ см}$  около  $10 \text{ Дж}$  энергии, при этом напряжение на индукторе должно быть около  $20 \text{ кВ}$ .

По выполненным расчетам была собрана установка для индукционного подогрева плазменного потока на входе в дисковый МГД-канал. С ее помощью в эксперименте был проведен подогрев аргона с  $8500^{\circ}\text{K}$  до  $9500^{\circ}\text{K}$  и этим увеличена плотность электронов в узкой кольцевой зоне  $2 \times 2 \text{ см}$  с  $0.6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  до  $1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , а магнитное число Рейнольдса, подсчитанное по параметрам подогретой зоны, увеличилось с  $0.13$  до  $0.28$ . Это позволило инициировать Т-слой в канале при напряженности внешнего магнитного поля  $4800 \text{ Э}$ .

Далее делается вывод по первой главе. Электроразрядные способы получения потока плазмы с температурной волной, рассмотрен-

ные в диссертации, отличаются предельным значением частоты генерируемых температурных возмущений. Для дуги постоянного тока, горящей в осевом плазмотроне с ВЧ-сопровождением и сопровождением постоянным током, эта величина составляет десятки герц. При дополнительном импульсном электрическом разряде она практически определяется техническими характеристиками элементов электрической схемы, и может быть несколько килогерц.

Во второй главе описано экспериментальное исследование возможности инициирования температурной волны в потоке плазмы (течения с Т-слоем) с помощью изохорического локального возмущения температуры, полученного индукционным разрядом.

В параграфах 8 и 9 описаны экспериментальная установка и методы измерения параметров плазмы: плотности электронов, давления, плотности тока в плазме и скорости ее течения. Плотность электронов - измерялась по поглощению инфракрасного излучения с длиной волны 10.6 мкм и по уширению линии водорода  $H\beta$ . Точность измерения  $Ne$  первым методом около 7%, а вторым около 10%. Давление измерялось пьезоэлектрическим методом с точностью 5±10%. Скорость измерялась с точностью 3% по фоторазверткам, полученным камерой СФР-1М. Плотность тока измерялась миниатюрными поясами Роговского, вносимыми в МГД-канал, с точностью 5±7%.

Далее, в параграфе 10 описываются эксперименты со смесями газов:  $Ar + 2\% H_2$ ,  $He + 2\% H_2$ ,  $CO_2 + 2\% H_2$ . Эксперименты проводились так, что вначале осуществлялся режим спонтанного образования Т-слоя в дисковом МГД-канале. Затем повышением начального давления в установке, при неизменных прочих условиях, параметры потока снижались настолько, что взаимодействие его с магнитным полем ослаблялось или прекращалось совсем. В этих условиях производился подогрев потока на входе в МГД-канал и изучалось пове-

чение подогретой зоны при ее движении по каналу.

Эксперименты показали, что в  $Ar + 2\% H_2$  при  $Ho = 4800$  наблюдается развитие Т-слоя из локального возмущения. Этот вывод сделан на основании сравнения экспериментальных данных, полученных в режиме спонтанного образования Т-слоя и при его развитии из локального изохорического возмущения. Возникновение Т-слоя в потоке плазмы характеризуется следующими признаками:

1. возникает зона скинирования внешнего магнитного поля в плазме, ширина которой значительно меньше длины МД-канала,

2. наблюдается значительное торможение потока, такое, что возникает отраженная волна, движущаяся вверх по потоку,

3. Джоулев нагрев превышает охлаждение плазмы, поэтому наблюдается ее разогрев и увеличение параметров по длине канала, например, плотности электронов. Для сравнения на рис. 4 приведены графики изменения  $Ne$  и  $\psi$  в смеси аргона с водородом в режиме спонтанного образования Т-слоя, на рис. 5 приведены те же параметры, но в режиме инициированного Т-слоя.

Образование Т-слоя из локального возмущения температуры наблюдается и в смеси  $He + 2\% H_2$ , но при большей, чем в аргоне напряженности магнитного поля, рис. 6. Эксперименты с  $CO_2$ , выполненные при максимально-возможных параметрах установки, не привели к инициированию устойчивого Т-слоя.

Далее анализируются результаты эксперимента и делается вывод о том, что добавление  $H_2$  к  $Ar$  и, особенно, к  $He$  облегчает развитие Т-слоя, снижая параметр Холла при начальных температурах ( $7000^\circ K + 8000^\circ K$ ) до значения меньше единицы. В экспериментах с  $CO_2$  влияние токов Холла было столь сильным, что не позволило осуществить инициирование Т-слоя в условиях данной установки.

Из анализа экспериментальных результатов делается вывод, что, по крайней мере, в смесях  $Ar + 2\% H_2$  и  $He + 2\% H_2$  токовый слой в потоке слабопроводящей плазмы в дисковом МГД-канале может быть инициирован с помощью локального изохорического возмущения температуры. Далее, в параграфе 13, для иллюстрации изложенного в предыдущих параграфах материала, приводится описание характеристик МГД-установки для изучения работы МГД-генератора с Т-слоем.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из содержания диссертации делаются выводы:

1. Показано, что управление мощностью плазмотронов с использованием ВЧ-тока сопровождения объясняется только тепловым воздействием ВЧ-тока на дуговой разряд.

2. Впервые экспериментально изучен вопрос развития Т-слоя в потоке слабопроводящей плазмы в магнитном поле из локального изохорического возмущения температуры.

3. Экспериментально доказана возможность осуществления "подхвата" в смесях газов  $Ar + 2\% H_2$  и  $He + 2\% H_2$ .

4. Экспериментально показано, что в чистых газах  $Ar, He, CO_2$ , а также в смеси  $CO_2 + 2\% H_2$  "подхват" из локального возмущения температуры неустойчив.

Основные результаты диссертации изложены в следующих печатных работах:

Г.М.В.Виноградов, В.И.Ромичев. Совместное горение дуги постоянного тока и высокочастотной дуги сопровождения, Изв. СО АН, сер. технических наук, 1971, в.2, с.63-77.

Г.М.В.Виноградов, В.И.Ромичев. Влияние высокочастотного тока на дугу постоянного тока при их совместном горении. Тезисы докладов V Всесоюзной конференции по генераторам низкотемпературной плазмы. Новосибирск, 1972, с.146-151.

3. В.П.Фомичев. Некоторые свойства дуг, горящих с ВЧ-сопровождением. Сб. трудов "Устойчивость горения электрической дуги", ИТФ СО АН СССР, 1973, с.171-179.
4. Ю.Н.Нечаев, В.П.Фомичев. Влияние ВЧ-тока на дуговой разряд постоянного тока. Сб. трудов "Устойчивость горения электрической дуги", ИТФ СО АН СССР, 1973, с.180-185
5. Ю.Н.Нечаев, В.П.Фомичев. Некоторые свойства дуги постоянного тока, горящей с высокочастотным сопровождением. Сб. трудов "Аэрофизические исследования" ИТПМ СО АН СССР, 1973,
6. Л.А.Заклязьминский, Л.Н.Пузырев, Ю.Ф.Трушников, В.П.Фомичев. Модель индукционного МГД-генератора на химическом топливе с использованием явления Т-слоя. Отчет ИТПМ СО АН СССР, № 403/374, 1969.
7. Н.Н.Яненко, С.С.Кацнельсон, А.Ю.Керкис, Г.А.Поздняков, В.М.Фомин, В.П.Фомичев. Искусственное инициирование Т-слоя в потоке плазмы, взаимодействующим с магнитным полем. ЧЛМСС, 1978, с.146-163
8. А.Ю.Керкис, Г.А.Ковальская, В.П.Фомичев. Измерение концентрации электронов по отношению интенсивностей трех участков контура линии  $H\beta$ . Тезисы докладов, V Всесоюзная конференция по физике низкотемпературной плазмы. Киев, 1979, с.325.
9. А.Ю.Керкис, Г.А.Поздняков, В.П.Фомичев. Иницирование Т-слоя в потоке плазмы, взаимодействующей с магнитным полем. Тезисы докладов, V Всесоюзная конференция по физике низкотемпературной плазмы. Киев, 1979, с.336.
10. А.Ю.Керкис, В.П.Фомичев. Конструкция и особенности применения пьезоэлектрических датчиков давления. Сборник докладов II Всесоюзная конференция по методам аэрофизических исследований, Новосибирск, 1979, с.102-104.

11. Н.П.Гриднев, С.С.Кацнельсон, А.Ю.Керкис, Г.А.Поздняков, Л.Н.Пузырев, В.П.Фомичев, Экспериментальные и теоретические исследования процессов взаимодействия плазмы с магнитным полем в импульсном МГД-генераторе с дисковым каналом. Вопросы магнитной газодинамики, Новосибирск, 1979, с.3-43
12. А.Ю.Керкис, Г.А.Поздняков, В.П.Фомичев. Некоторые методы экспериментального исследования МГД-течений в импульсных электроразрядных установках. Вопросы магнитной газодинамики, Новосибирск, 1979, с.170-202.

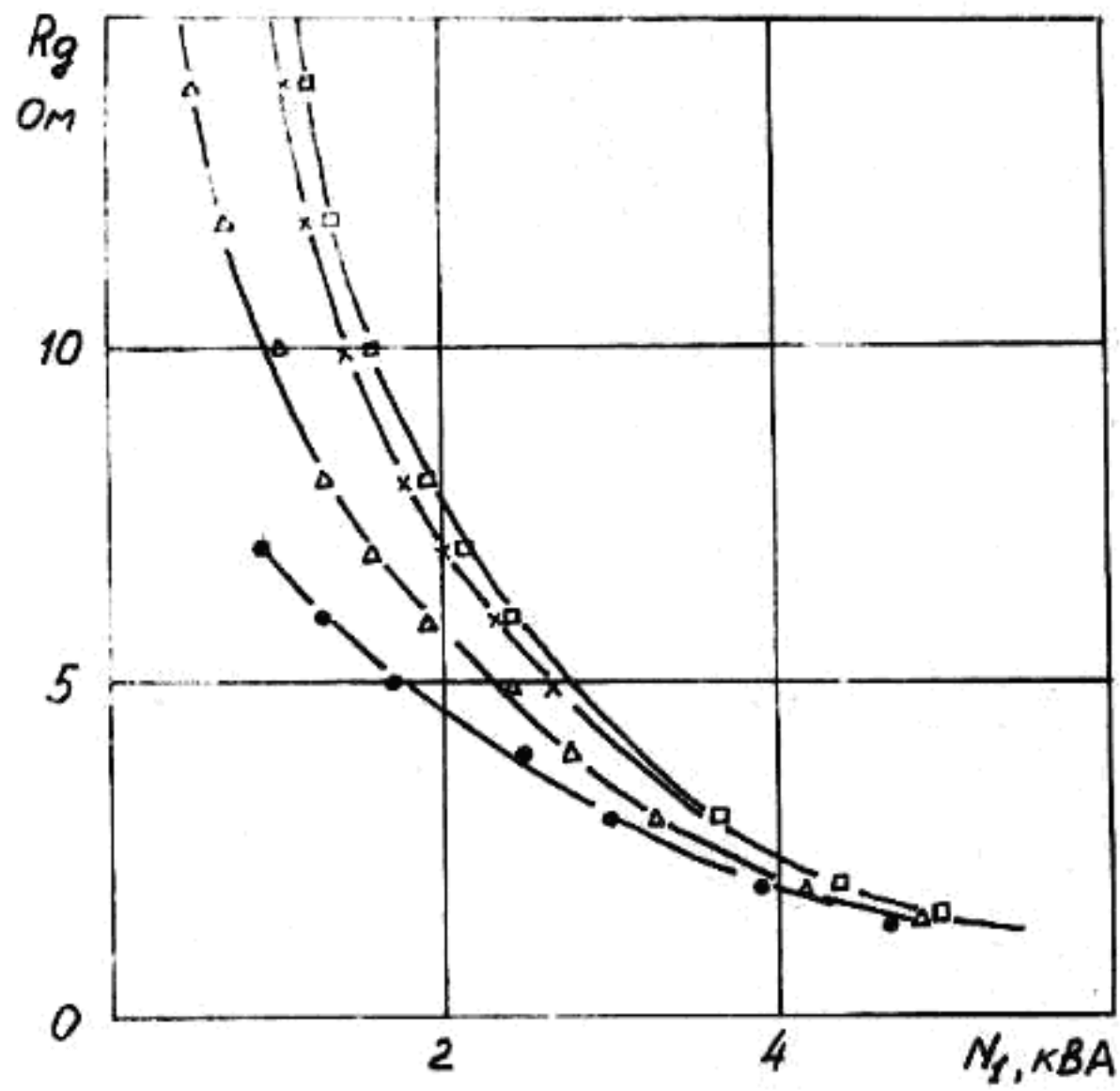
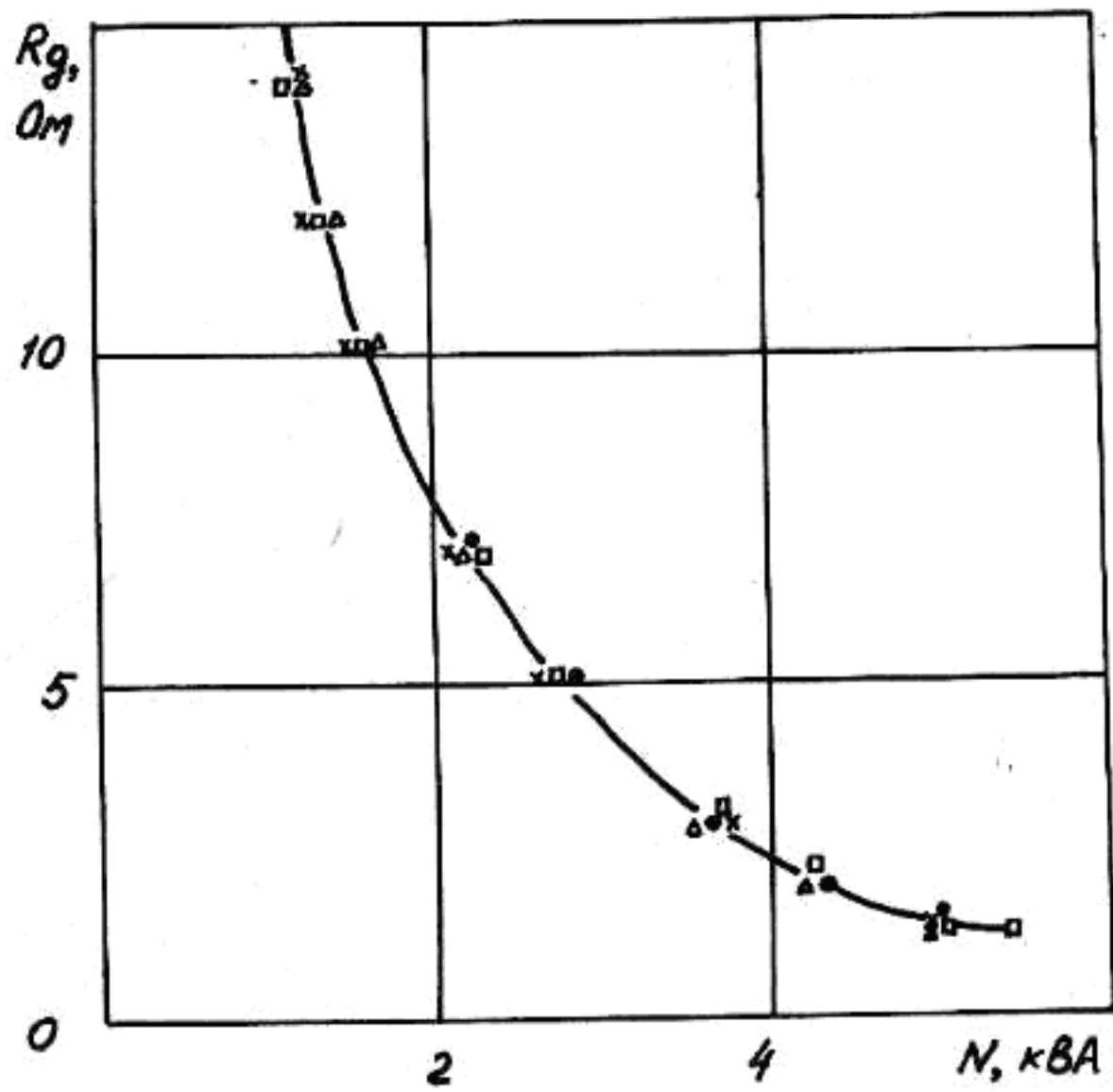


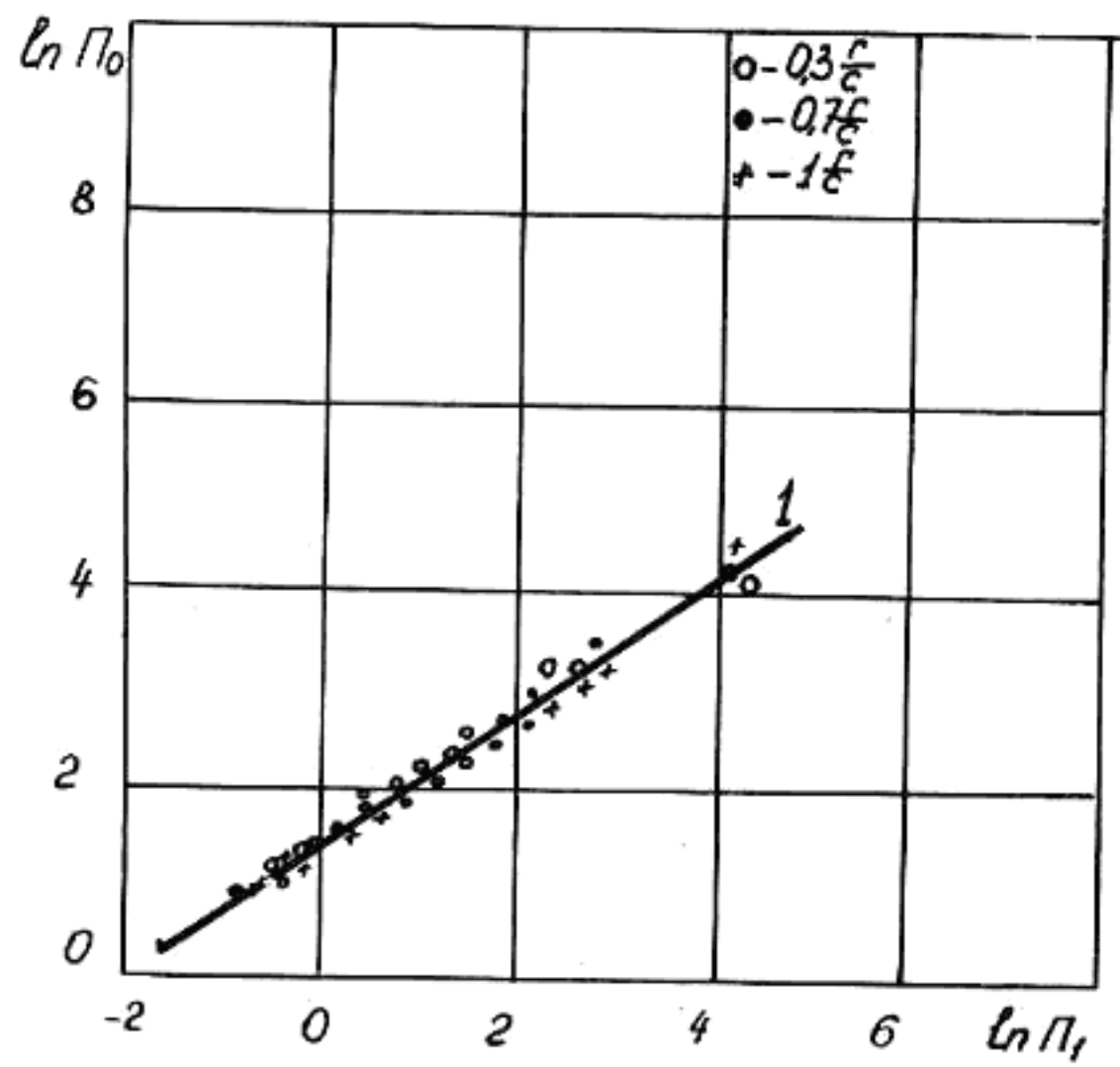
Рис. 1





$$N = (N_1 + N_2) \left( \frac{I_0}{I_1} \right)^{0.3}$$

Рис.2



$$1 - \ln \Pi_0 = 1,5 + 0,71 \ln \Pi_1$$

Рис. 3

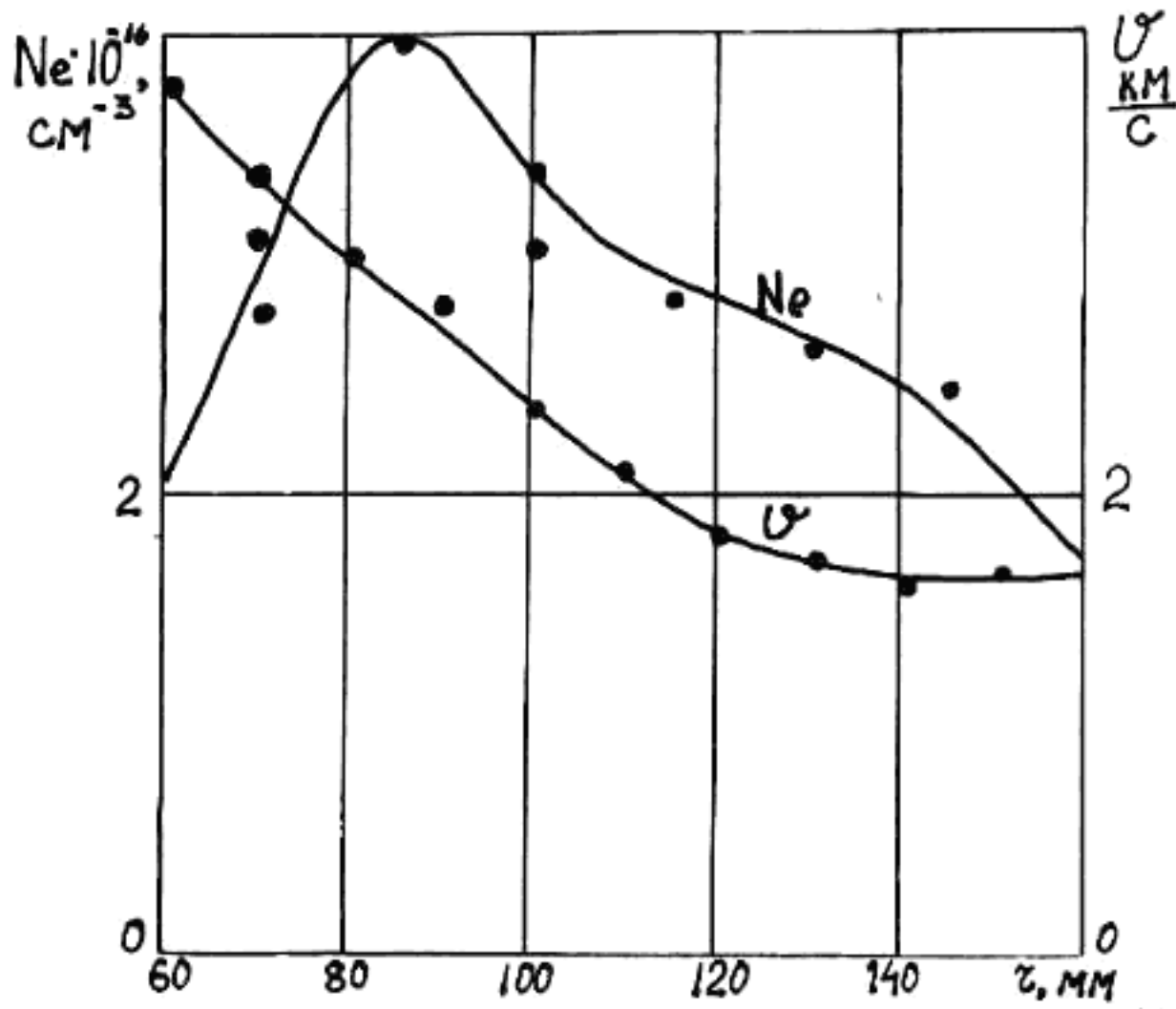


Рис. 4 Изменение плотности электронов в Т-слое Ne и скорости его движения  $U$  по радиусу дискового МГД-канала в режиме спонтанного образования Т-слоя.  $Ar+2\%H_2$ ,  $P = 2 \text{ мм рт.ст.}$ ,  $H = 3200 \text{ Э.}$

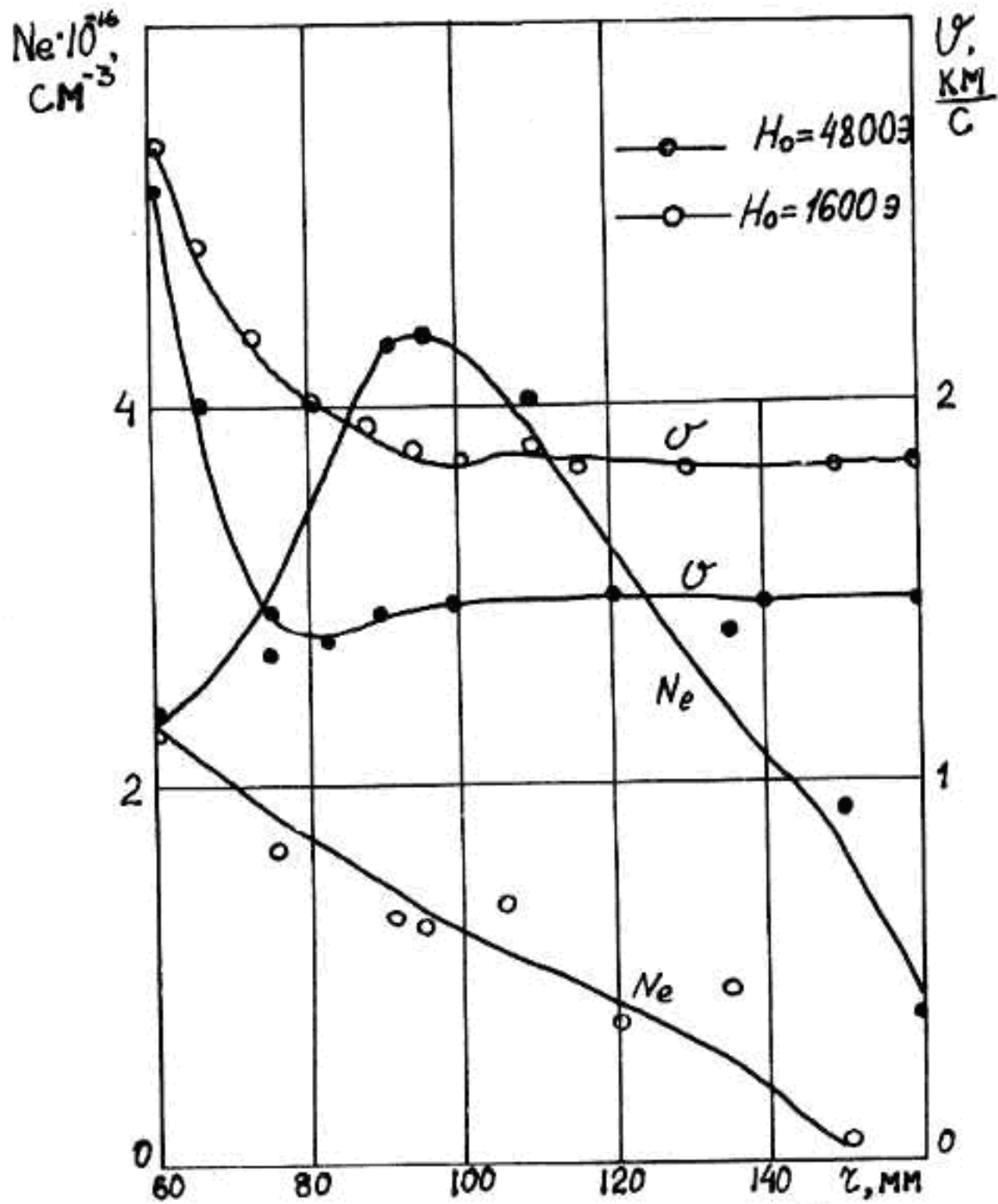


Рис. 5 Изменение плотности электронов  $Ne$  в подогретой зоне и скорости её движения в дисковом МГД-канале.  $Ar + 2\% H_2$ ,  $P = 11 \text{ мм рт.ст.}$ ,  $H = 4800 \text{ Э}$ .

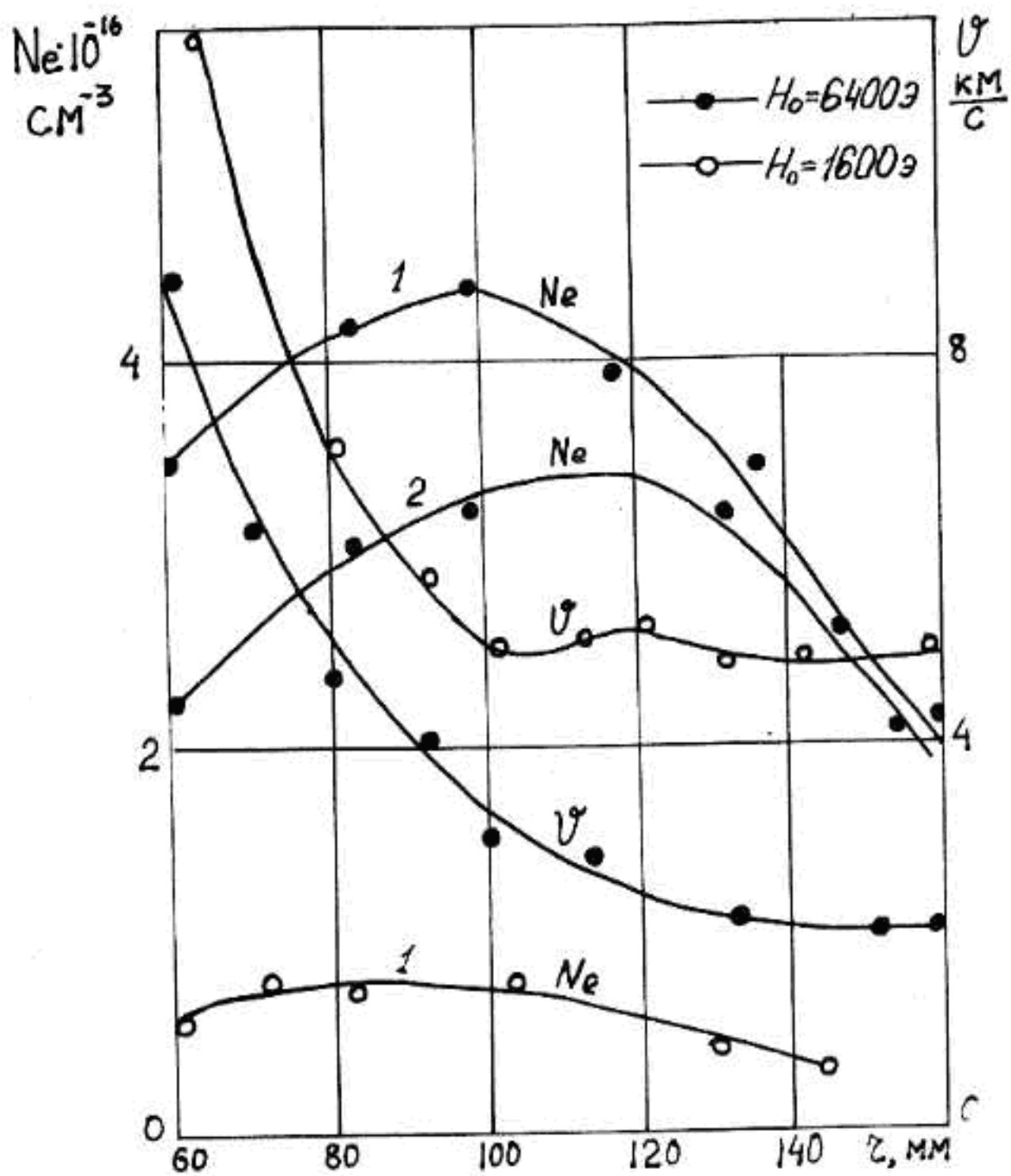


Рис. 6 Изменение плотности электронов  $N_e$  в подгретой зоне и скорости её движения  $v$  в дуге МГД-канале.  $\text{He} + 2\% \text{H}_2$ ,  $P = 27 \text{ мм рт.ст.}$ , 1-с подогревом, 2-без подогрева.

ОТВЕТСТВЕННЫЙ ЗА ВЫПУСК ФОМИЧЁВ В.П.

Подписано к печати 30.07.80г., МН 07228,  
Формат 60x84/16, Усл. печ. л. 1.0, Уч. изд. л. 1.0,  
Заказ №399, Тираж 120 экз., Бесплатно

Отпечатано на ротапринте ИТПМ СО АН СССР,  
630090, Новосибирск-90, Институтская, 4/1.