

О НЕОДНОРОДНОСТЯХ ПОТОКА В ИМПУЛЬСНОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ УСКОРИТЕЛЕ

А. М. Рушайло

(Москва)

В ряде работ [1-7], выполненных на различных импульсных электромагнитных ускорителях, было отмечено появление слоистой структуры в потоке ускоряемого ионизированного газа с частотой колебаний несколько мегагерц. Большинство авторов связывает возникновение неоднородностей в потоке с локальными особенностями протекания электрического тока (вторичные пробои [6], образование микропинчей [3-5], движение токовой спирали [2] и т. п.). Несмотря на общность многих свойств неоднородностей, зарегистрированных в различных условиях, пока не существует единой точки зрения на природу их возникновения.

В данной работе методами щелевой фоторазвертки проведено экспериментальное исследование некоторых особенностей возникновения неоднородностей потока в коаксиальном эрзионном ускорителе. На основании экспериментальных данных высказывается предположение о влиянии электромагнитного концевой эффекта на появление неоднородностей. Показано, что плоские неоднородности осесимметричной формы появляются в зонах торможения потока за концевой ударной волной и вблизи поверхности электродов в конце канала ускорителя.

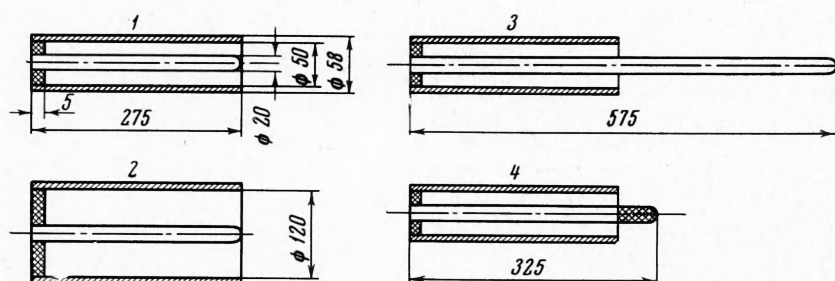
Отмечено влияние деадсорбции и испарения с поверхности электродов на возникновение неоднородностей. Проведены эксперименты по искусственному возбуждению глубоких и устойчивых неоднородностей путем торможения потока в зонах интенсивного испарения изолятора.

1. Эксперименты проводились на установке, частично описанной в работах [8,9]. Основные параметры установки: емкость батареи конденсаторов — 1480 мкф, начальная индуктивность — 50 нгн, давление в рабочей камере — $2-5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Запас энергии в конденсаторах изменялся в диапазоне 6.6—18.5 кдж при напряжении от 3 до 5 кв. Характерное время работы ускорителя (полупериод разряда) составляло 35—40 мсек, а максимальные значения полного тока — до 450 ка. По форме разряд был близким к аperiодическому.

Рабочим телом служил материал эрозии фторопластового изолятора и, частично, медных ускоряющих электродов. Одновременно фторопластовый изолятор служил стабилизатором разряда в начальном участке цилиндрического канала.

По данным интегральных измерений (совмещенный маятник-калориметр, спектроскопия, взвешивание, скоростная киносъемка и др.) в процессе одного разряда масса рабочего тела от 1 до 6 мг ускорялась до скоростей 60—80 км/сек. Характерная плотность частиц в потоке находилась в диапазоне $10^{15}-10^{17}$ см⁻³, а электронная температура была порядка $3 \cdot 10^4$ К [10].

Установка работала в режиме «ждущего» напряжения. Разряд инициировался высоковольтным импульсом скоростной фоторегистрирующей камеры СФР, усиленным по мощности разрядом емкости 1 мкф при напряжении 2—5 кв.



Фиг. 1

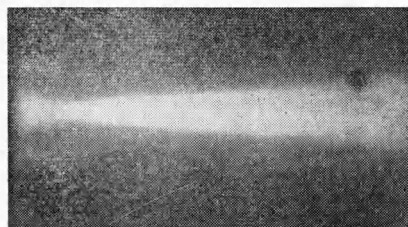
Схема и размеры ускоряющих электродов, использованных в экспериментах, показаны на фиг. 1. В ряде случаев для наблюдения за потоком внутри канала в наружном электроде равномерно по длине делались 4 отверстия диаметром 1 см. Крайние отверстия находились на расстоянии 1 см от изолятора и от среза электродов.

Щелевая развертка осуществлялась камерой СФР. При ширине щели 0.05—0.1 мм и скорости вращения зеркала от 45 000 до 90 000 об/мин (скорость светового луча на фотопленке от $2.25 \cdot 10^9$ до $4.5 \cdot 10^9$ см/сек) временное разрешение системы составило от

10 до 50 *нсек*. Исследования проводились при горизонтальной (вдоль потока) и вертикальной (поперек потока) ориентации щели. Линейный коэффициент уменьшения изображения был равен 3.

Магнитное поле в ускорителе измерялось катушечными магнитными зондами, помещенными в кварцевую трубку [11]. Использовались магнитные зонды эллипсоидной формы с размерами $6 \times 3 \times 2.5$ мм³. Зонды состояли из 80 витков медного провода диаметром 0.08 мм и обладали индуктивностью 1.5 мкГн. При чувствительности $5 \cdot 10^{-5}$ в/Гс магнитные зонды позволяли регистрировать без заметных искажений колебания поля с частотой до 30 МГц. Сигнал магнитного зонда интегрировался RC-цепочкой и регистрировался осциллографом ОК-17М.

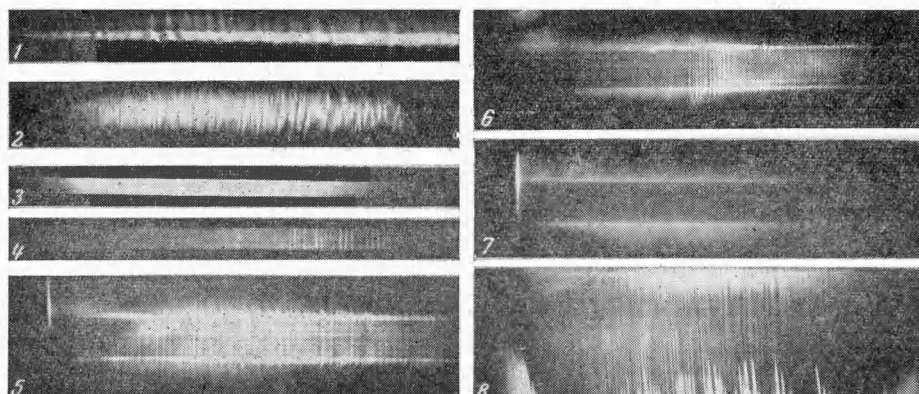
2. В рассматриваемом ускорителе время пребывания ускоряемой частицы внутри канала на порядок меньше времени разряда, поэтому, в известном смысле, течение можно считать квазистационарным. Ускоряемый ионизированный газ на срезе ускорителя испытывает в радиальном направлении электромагнитное и газодинамическое силовое воздействие, приводящее к повороту потока к оси и образованию косоугольного скачка уплотнения. Теоретически концевые эффекты были рассмотрены в работе [12].



Фиг. 2

До ударной волны основной поток вытекает слабо. Увеличение температуры за скачком уплотнения приводит к резкому увеличению излучения и позволяет регистрировать поток при высокоскоростной киносъемке. На фиг. 2 приведена фотография, снятая за срезом ускорителя на СФР с временем экспозиции 0.6 мксек. На фотографии хорошо видна конусообразная ударная волна, возникающая в потоке при обтекании внутреннего электрода. Ударная волна, обусловленная концевым эффектом, наблюдалась на всех рассмотренных здесь моделях ускорителя при всех режимах его работы.

Щелевая развертка увеличила временное разрешение и позволила обнаружить, что течение в зоне за ударной волной является неоднородным. На фиг. 3 приведены вертикальные щелевые развертки 1, 2, снятые на модели ускорителя 1 на расстоянии 1 и 10 см от среза ускорителя. Направление развертки и скорости течения здесь слева направо. Развертка 1 на фиг. 3 получена при скорости вращения зеркала 90 000 об/мин, остальные развертки, приведенные в работе, получены при скорости 45 000 об/мин.



Фиг. 3

Из развертки 2 (фиг. 3) видно, что течение за ударной волной имеет слоистую структуру с волнами, близкими по форме к плоским. Обработка многочисленных экспериментов показала, что частота световых неоднородностей в зоне за ударной волной находится в диапазоне от 5 до 20 МГц. При скорости потока $6.5 \cdot 10^6$ см/сек длина волны неоднородностей (расстояние между двумя идущими друг за другом плоскими образованиями с повышенной светимостью) составляет от 3 до 13 мм.

Слоистая структура течения за концевой ударной волной зарегистрирована на различных расстояниях от конца электродов и при всех режимах работы ускорителя.

Вертикальная развертка потока *1* в непосредственной близости от среза (1 см) показывает (фиг. 3), что в потоке, втекающем в зону ударной волны, есть слои с неоднородной структурой. Эти слои, толщиной в несколько миллиметров, появляются внутри канала ускорителя и стекают с поверхности внутреннего электрода.

На фиг. 3 показана вертикальная развертка потока *5*, полученная непосредственно на срезе ускорителя *1* при съемке под небольшим углом оптической оси СФР к плоскости среза. В поле зрения щели СФР находилась поверхность внутреннего электрода и часть внутренней поверхности наружного электрода. Из развертки *5* (фиг. 3) видно, что в узкой зоне, примыкающей к внутреннему электроду, через некоторое время после начала разряда возникают плоские волны с частотой порядка 5 мГц.

Развертки, снятые через отверстия в наружном электроде, показали, что неоднородности внутри канала отсутствуют. Для иллюстрации на фиг. 3 приведена вертикальная развертка *3*, снятая через первое отверстие (1 см от изолятора) модели *1* с разрешением до 50 мГц.

Исключение представляет собой четвертое отверстие (1 см от среза). Развертка *4*, снятая через это отверстие, показала, что в конце канала ускорителя поток становится неоднородным (фиг. 3).

Три вертикальные развертки *5*, *6*, *7*, снятые при одинаковых условиях в трех последовательных экспериментах под небольшим углом на срезе ускорителя *1* (фиг. 3), показывают, что время задержки появления неоднородностей вблизи внутреннего электрода в конце канала от эксперимента к эксперименту изменяется. Этот эффект рассмотрен в конце статьи.

Характерная горизонтальная щелевая развертка *8* потока на выходе из ускорителя приведена также на фиг. 3. Щель СФР находилась на расстоянии 1.2 см от оси ускорителя на уровне светящегося приэлектродного слоя. Направление развертки слева направо, направление скорости потока сверху вниз.

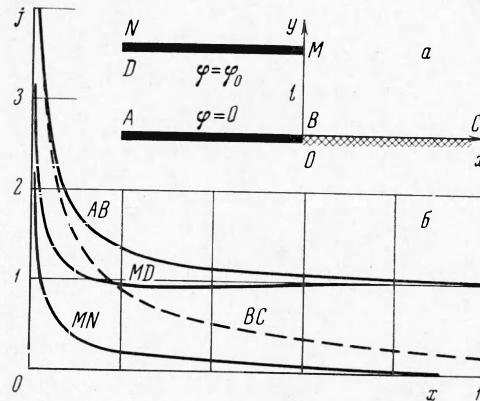
Из СФР-граммы видно, что неоднородности движутся вместе с потоком со скоростью 60—80 км/сек, сохраняя устойчивость на всем видимом пути их перемещения. В зоне концевой ударной волны яркость неоднородностей резко увеличивается.

Существующие теории слоистой структуры течения в импульсных ускорителях не могут в достаточной мере объяснить приведенные здесь экспериментальные результаты. Теория повторных пробоев на изоляторе за движущимся токовым фронтом [6] в данном случае неприемлема, так как в начальном участке канала неоднородности не наблюдались. Теория спирального протекания электрического тока [2] также не может объяснить картину течения, так как неоднородности имеют, как правило, правильную плоскую форму, хорошо сохраняющуюся в течение длительного времени. По тем же причинам кажется маловероятным объяснение рассмотренных здесь неоднородностей рождением и срывами токовых микропинчей [3-5].

Концевой эффект, выражающийся в выносе части электрического тока за пределы ускорителя, приводит к образованию ударной волны. Однако электромагнитный концевой эффект распространяется на некоторое расстояние и внутрь канала. Возможное отклонение линий тока от радиального направления внутри канала должно привести к появлению радиальной составляющей электромагнитной силы, прижимающей плазму к электродам. Аналогично колебаниям светимости за концевой ударной волной неоднородность потока в конце коаксиального канала может быть связана с газодинамическим уплотнением потока у поверхности электродов, вызванным концевым эффектом. Это предположение позволяет объяснить появление неоднородностей лишь в конце канала в узкой зоне вблизи электрода.

Для подтверждения высказанного предположения были проведены некоторые оценки и специальные эксперименты.

3. Чтобы оценить глубину проникновения концевого эффекта внутрь коаксиального канала, степень наклона линий электрического тока к оси и различие картины распределения линий тока у внутреннего и наружного электродов, была решена модельная электростатическая задача о распределении электрического тока между двумя плоскими полубесконечными идеально проводящими электродами, продолжением одного из ко-



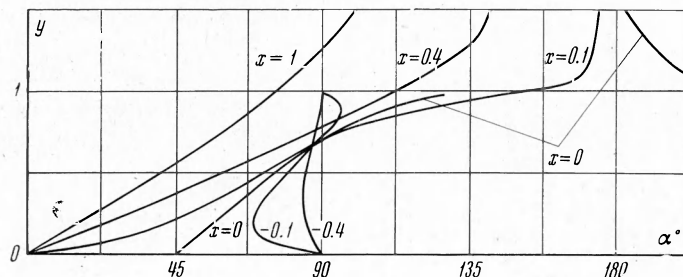
Фиг. 4

торых является изолятор (фиг. 4, а). Проводимость среды в полупространстве $y > 0$ предполагается постоянной¹.

Задача решалась методом конформных отображений [14]. В качестве граничных условий принималось отсутствие касательной составляющей тока на электродах и нормальной составляющей тока на изоляторе.

Некоторые результаты решения модельной задачи приведены на фиг. 4, б и фиг. 5.

На фиг. 4, б дано распределение абсолютной величины тока на поверхности электродов и изолятора. По оси ординат отложена безразмерная величина тока $j = j_* \times \times l / \varphi_0$, а по оси абсцисс — модуль безразмерной координаты $x = |x_*| / l$, где l — расстояние между электродами, а φ_0 — разность потенциалов. Звездочкой обозначены размерные величины.

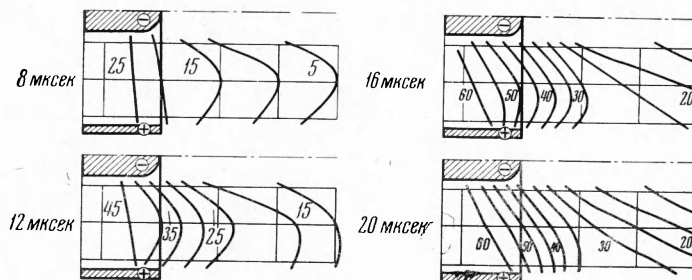


Фиг. 5

Видно, что концевой эффект на поверхности электродов проникает в глубь канала на величину порядка одного калибра.

На фиг. 5 приведены зависимости угла наклона линий электрического тока ($\operatorname{tg} \alpha = = j_x / j_y$) от безразмерной координаты $y = y_* / l$ с координатой x в качестве параметра. Из графиков следует, что картина линий тока несимметрична. Снос тока вблизи нижнего электрода происходит в несколько раз более интенсивно, чем вблизи верхнего электрода. Минимальный угол наклона линий тока внутри канала составляет 45° .

Модельная задача показывает, что концевой эффект распространяется внутрь канала на глубину порядка ширины канала и проявляется вблизи поверхности нижнего электрода (в случае коаксиала, вблизи внутреннего электрода) в несколько раз интенсивнее, чем у поверхности верхнего (наружного) электрода. Учет течения проводящей среды, магнитного поля и противоз. д. с., так же как и учет двумерности течения в коаксиальном канале, должен лишь усилить отмеченные зависимости.



Фиг. 6

Проведенная оценка и сделанные предположения позволяют объяснить, почему неоднородности появляются лишь в конце канала и проявляются гораздо сильнее вблизи внутреннего электрода и слабо видны у поверхности наружного электрода.

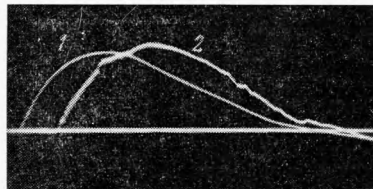
4. Измерения, проведенные на модели 2 при помощи магнитных зондов, показали, что разряд и магнитное поле в ускорителе обладают хорошей азимутальной симметрией, а магнитный зонд не вносит существенных искажений в распределение токов и магнитных полей. В этих условиях по продольному и радиальному распределению магнитного поля в области среза ускорителя была построена приближенная картина

¹ Поставленная задача является комбинацией двух классических задач о конденсаторе и о распределении тока в канале с плоскими электродами и изоляционными перегородками [13].

линий токов. Картины линий токов для нескольких характерных моментов времени приведены на фиг. 6. Показана нижняя относительно оси область среза ускорителя. Числами обозначена величина тока, протекающего справа от линии тока. Линии тока находились в предположении линейного изменения поля между двумя соседними точками измерения. Расстояния между точками измерения составляли 3 см вдоль оси и 2 см вдоль радиуса.

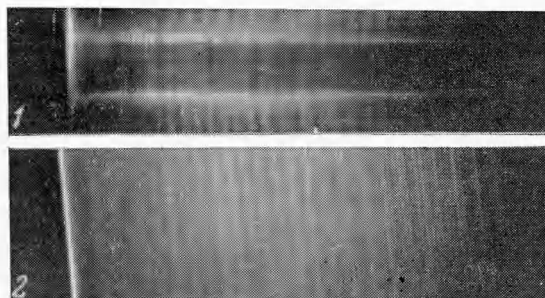
Из фиг. 6 видно, что в целом экспериментально найденная картина линий тока хорошо согласуется с проведенной выше оценкой. Действительно, резкий наклон линий тока наблюдается не только за срезом ускорителя, но и на некотором расстоянии внутри канала.

На фиг. 7 приведена характерная осциллограмма полного тока 1 и магнитного поля 2 в точке, расположенной на срезе ускорителя в 1.6 см от оси. Начальное напряжение — 3 кВ, максимальные значения тока и магнитного поля на осциллограмме составляют соответственно 170 кА и $5 \cdot 10^3$ Гс. Полупериод тока на осциллограмме составляет 37 мксек. Несмотря на высокие частотные характеристики магнитного зонда и помещение зонда непосредственно в зоне появления неоднородностей, осциллограмма магнитного поля не обладает высокочастотными колебаниями с заметной глубиной модуляции. Отсутствие существенных колебаний магнитного поля может служить косвенным подтверждением того, что неоднородности в рассмотренных опытах не связаны с сильными токовыми флуктуациями.



Фиг. 7

5. Предположение о влиянии концевой эффекта на возникновение неоднородностей внутри канала проверялось в следующем эксперименте. На модели с внешним электро-



Фиг. 8

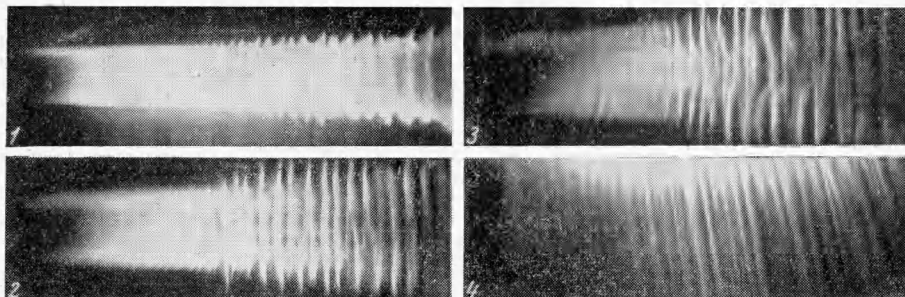
дом длиной 27 см и внутренним электродом длиной 57 см (модель 3) наклон линий тока у поверхности внутреннего электрода в области среза должен практически отсутствовать. Концевой эффект должен на этой модели резче проявиться вблизи поверхности внешнего электрода. Действительно, вертикальная щелевая развертка 1, снятая под небольшим углом на срезе внешнего электрода, и горизонтальная развертка 2, снятая на выходе над поверхностью внутреннего электрода (фиг. 8), показывают, что неоднородности, возникающие у внешнего электрода, заметно усилились, а у внутреннего электрода — уменьшились. Частота колебаний во внешней и внутренней зонах составила соответственно 1.1 и 4.5 мГц при средней скорости перемещения $7 \cdot 10^6$ см/сек. Следовательно, расстояние между неоднородностями во внешней и внутренней зонах потока разное и составляет соответственно 6 и 1.5 см.

На горизонтальной щелевой развертке видны наложенные друг на друга колебания двух разных частот, так как в поле щели попадают одновременно обе приэлектродные области.

Газодинамический и электромагнитный поворот потока на выходе из канала у внутреннего электрода отсутствует в силу специфики модели, поэтому истечение, как видно и из СФР-грамм, происходит без образования концевой ударной волны.

6. Как было показано выше, слоистость потока в приэлектродной зоне изменяется от разряда к разряду. С ростом числа запусков установки интенсивность неоднородностей уменьшалась, время запаздывания их появления увеличивалось, а в ряде случаев неоднородности полностью исчезали (фиг. 3).

Отмеченный результат можно объяснить деадсорбцией с поверхности электродов остаточных газов и паров вакуумного масла в процессе нагрева электродов [8]. Косвенным подтверждением деадсорбции является тот факт, что в первых после длительного перерыва экспериментах давление в рабочей камере на порядок превышает давление, возникающее в камере в последующих экспериментах. Деадсорбция оказывает заметное влияние и на интегральные характеристики, снижая на 20—30% энергетический к. п. д. и увеличивая на 40—50% импульс ускорителя в первом эксперименте.



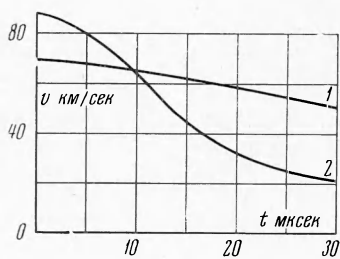
Фиг. 9

Предположение о влиянии деадсорбции и испарения на возникновение неоднородностей положено в основу эксперимента по искусственному усилению неоднородностей.

Внутренний электрод ускорителя был продолжен изоляционным насадком (фиг. 1, модель 4). Материалом насадка служил плексиглас, фторопласт или окись алюминия.

Большие плотности электрического тока на границе электрод — насадка приводили к значительной эрозии изолятора. По данным взвешивания масса испаряющегося в одном разряде изолятора составляла величину, сравнимую с массой ускоряемого в обычных условиях рабочего тела.

Эксперимент с изоляционным насадком был продолжением эксперимента с удлиненным внутренним электродом. Кроме увеличения эрозии, преследовалась цель разделения электромагнитного и газодинамического поворотов потока на выходе из ускорителя. Ясно, что на поток в области границы электрод — насадка действуют в основном электромагнитные силы, которые из-за концевой эффекта должны прижимать поток к поверхности электрода и насадка, вызывая появление ударной волны. Газодинамический поворот потока должен происходить независимо от электромагнитного на конце изолятора.



Фиг. 10

Результаты эксперимента с насадком из плексигласа приведены на фиг. 9. Под номером 1, 2 и 3 показаны вертикальные щелевые развертки, снятые на расстоянии 2.5, 4.5 и 6.5 см от конца внутреннего электрода, а под номером 4 — горизонтальная щелевая развертка, снятая на расстоянии 0.3 см от поверхности изолятора. Начальное напряжение — 5 кВ.

Из СФР-грамм видно, что в узкой цилиндрической зоне у поверхности изолятора возникает яркая область течения за концевой ударной волной. Первые 10—15 мксек течение остается однородным. Затем с частотой 0.5—1.5 мгу в пристеночном потоке возникают плоские волны, устойчиво перемещающиеся вдоль ускорителя. Граница светящейся зоны начинает при этом расширяться и пульсировать. Плоская структура неоднородностей потока сохраняется далеко за пределами изолятора.

На фиг. 9 приведена щелевая развертка 3, снятая за концом изолятора. Из этой развертки видно, что вблизи оси потока плоские волны претерпевают расслоение, которое вызвано торможением потока при обтекании конца изолятора. Искривление и расслоение полос неоднородностей подтверждает связь неоднородностей с потоком и влияние газодинамического воздействия на поворот потока за срезом ускорителя.

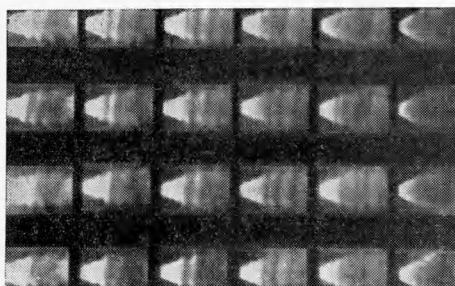
Искусственное возбуждение неоднородностей в потоке описанным методом не зависело от времени между экспериментами, т. е. от степени деадсорбции газа электродами.

Неоднородности, полученные в экспериментах с насадками из плексигласа и из фторопласта, были практически одинаковыми. При более тугоплавком изоляторе, ка-

ким является окись алюминия, отмечено увеличение частоты появления неоднородностей до 10—12 мгу.

Искусственное возбуждение неоднородностей сопровождается интенсивным испарением и большим, чем в обычных условиях, торможением потока, о чем свидетельствуют приведенные на фиг. 10 кривые изменения скорости по времени. Скорость определялась по наклону полос горизонтальной щелевой развертки на оси модели 1 (кривая 1) и над внутренним электродом модели 4 (кривая 2). Отличие в начальной скорости можно объяснить торможением потока при обтекании конца внутреннего электрода на модели 1. Из фиг. 10 следует, что испарение изолятора приводит к уменьшению скорости потока от $8 \cdot 10^6$ до $2 \cdot 10^6$ см/сек. Так как процесс испарения отличается инерционностью, то торможение потока и появление неоднородностей имеют некоторое время запаздывания.

Уменьшение скорости потока позволило при помощи СФР получить общую фотографию распространения неоднородностей. Несколько фотографий из покадровой СФР-граммы, снятой за срезом модели 4 с плексигласовым насадком на внутреннем электроде, приведены на фиг. 11. Последовательность кадров здесь снизу вверх, слева направо. Частота съемки $3 \cdot 10^6$ кадр./сек. Приведенные фотографии потока показывают, что неоднородности имеют плоскую осесимметричную форму, зарождаются в зоне между концевой ударной волной и изолятором и с интервалом 3—4 см перемещаются, расширяясь, вдоль потока со скоростью порядка $2.5 \cdot 10^6$ см/сек.



Фиг. 11

Таким образом, эксперименты по искусственному возбуждению неоднородностей в эрозионном импульсном ускорителе подтвердили предположение о связи отмеченных в данной работе неоднородностей с вязким, газодинамическим торможением потока, испарением и адсорбцией с поверхности электродов.

Поступила 4 II 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. Кварцхава И. Ф., Меладзе Р. Д., Суладзе К. В. Опыты по электродинамическому ускорению плазмы. Ж. техн. физ., 1960, т. 30, вып. 3.
2. Скворцов Ю. В., Комельков В. С., Церевитинов С. С. Структура магнитных полей в плазменной струе с собственными токами. Ж. техн. физ., 1964, т. 34, вып. 6.
3. Григорьев В. Н. О структуре плазменных сгустков в электродинамическом ускорителе. ПМТФ, 1965, № 2.
4. Осадин Б. А. К вопросу о формировании сгустков в импульсном ускорителе плазмы. Ж. техн. физ., 1965, т. 35, вып. 7.
5. Деревщиков В. А. Измерение скоростей компонент плазмы с помощью скоростной съемки в монохроматическом свете. Ж. техн. физ., 1967, т. 37, вып. 2.
6. Кварцхава И. Ф., Меладзе Р. Д., Хаутиев Э. Ю., Решетняк Н. Г., Синявский А. П. О причинах ограничения скорости плазмозмодов в рельсотронах. Ж. техн. физ., 1966, т. 34, вып. 4.
7. Mawardi O. K., Narghi M. Measurements on current sheets in plasmas. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1963, vol. 10, No. 1.
8. Рушайло А. М. Измерение тепловых потоков и оценка температуры электродов в импульсном электромагнитном ускорителе плазмы. ПМТФ, 1965, № 4.
9. Рушайло А. М. О тепловых потерях в импульсном ускорителе плазмы. ПМТФ, 1968, № 1.
10. Иванова Л. Е. Исследование состава и распределение электронной и ионной температуры по сечению струи плазмы за срезом импульсного электромагнитного ускорителя. Изв. СО АН СССР, 1968, вып. 1, № 3.
11. Диагностика плазмы М., «Мир», 1967.
12. Бам-Зеликович Г. М. Течение проводящего газа в струе за срезом электромагнитного ускорителя. ПМТФ, 1967, № 1.
13. Sattton G. W., Carlson A. W. End effects in inviscid flow in a magnetohydrodynamic channel. J. Fluid. Mech., 1961, vol. 11, No 1.
14. Лаврентьев М. А. Шабат Б. С. Методы теории функций комплексного переменного. М., Физматгиз, 1958.