

АКАДЕМИЯ НАУК ЛАТВИЙСКОЙ ССР

ОБЪЕДИНЕННЫЙ СОВЕТ ОТДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ
И ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК АКАДЕМИИ НАУК ЛАТВИЙС-
КОЙ ССР

На правах рукописи

Буцениекс Имант Эдуардович

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ НЕОДНО-
РОДНЫХ МГД-ТЕЧЕНИЙ В ПРИМЕНЕНИИ К
ЗАДАЧАМ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ ЖИДКОГО
МЕТАЛЛА

(О1.02.05 — механика жидкостей, га-
за и плазмы)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой сте-
пени кандидата технических
наук

РИГА — 1973

АКАДЕМИЯ НАУК ЛАТВИЙСКОЙ ССР
ОБЪЕДИНЕННЫЙ СОВЕТ ОТДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ
И ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК АКАДЕМИИ НАУК ЛАТВИЙСКОЙ ССР

На правах рукописи

Буценжекс Имант Эдуардович

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ НЕОДНОРОДНЫХ
МГД-ТЕЧЕНИЙ В ПРИМЕНЕНИИ К ЗАДАЧАМ УПРАВЛЕНИЯ
ПОТОКАМИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

(01.02.05 - механика жидкостей, газа и плазмы)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

РИГА - 1973

Работа выполнена в лаборатории магнитной гидравлики
Института физики Академии наук Латвийской ССР.

Научный руководитель - кандидат физико-математических
наук Шербинин Э.В.

Официальные оппоненты: член-корреспондент АН Латв. ССР,
доктор технических наук Лиелпетер Я.Я., кандидат физико-ма-
тематических наук Штери А.Г.

Ведущее предприятие - Латвийский государственный
университет им. Петра Стучки.

Автореферат разослан "12" окт 1973 г.

Защита диссертации состоится "12" дек 1973 г.
на заседании Объединенного Совета Отделения физических и
технических наук АН Латв. ССР, г. Рига, ГСП, ул. Тургене-
ва, 19.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной
библиотеке АН Латв. ССР, г. Рига, ул. Коммунальная, 4.

Ученый секретарь Совета

М. Закис.

В В Е Д Е Н И Е

К настоящему времени накоплен достаточно богатый арсенал методов воздействия магнитного поля на течение жидких металлов. Тем не менее электромагнитные способы управления потоками жидких металлов пока не нашли достаточно широкого применения при решении задач технологического назначения.

Применение МГД-методов представляется целесообразным в тех случаях, когда механические способы управления потоками жидких металлов трудно реализуемы и мало эффективны. Так, например, широкий круг задач по управлению жидким расплавом возникает в металлургии при непрерывной разливке металла $[1^{\circ}]$, в связи с использованием жидкого металла в качестве теплоносителя в реакторах на быстрых нейтронах $[2^{\circ}]$ и т. д., т. е. в тех случаях, когда по условиям производства используются жидкие проводящие среды, зачастую высокотемпературные и поэтому особо агрессивные.

Известны попытки применения индукционных методов воздействия на расплавы с помощью бегущего магнитного поля. Во многих случаях они дают положительный результат, однако по различного рода причинам индукционные методы не всегда достаточно эффективны. Поэтому на практике не прекращаются поиски новых, более простых МГД-способов управления потоками жидкого металла, в частности, с помощью постоянного магнитного поля.

Однако, прежде чем переходить к практической реализации

и использованию МГД-явлений, возникающих при течении металла в постоянном магнитном поле, необходимо дальнейшее проведение исследований с целью получения более полных сведений об условиях реализации тех или иных МГД-явлений.

В дополнение к уже имеющейся информации в настоящей работе изучены методы формирования скоростной структуры течения с помощью наклонного магнитного поля, а также интегральные характеристики такого рода течений, которые не исследовались ранее.

Как известно, магнитное поле оказывает наиболее сильное влияние на резко неоднородные в отсутствие поля течения, а также в тех случаях, когда резко меняются граничные условия для электромагнитного поля. Этими обстоятельствами мы и руководствовались при выборе объектов исследования.

Неоднородные скоростные структуры в магнитном поле можно, например, создавать используя проточные тракты с различной проводимостью стенок, либо изменяя геометрию границ течения. При исследовании первого вида течений основное внимание было уделено наименее изученному случаю, когда магнитное поле произвольно ориентировано по отношению к проводящим частям периметра проточного тракта, при исследовании второго вида течений - изучению явлений в таких проточных трактах, которые с одной стороны почти не изучены, а с другой стороны - наиболее удобны с точки зрения технологии их изготовления. К последним в первую очередь относятся проточные тракты круглого поперечного сечения.

Задачи диссертационной работы состояли таким образом в

изучении закономерностей формирования неоднородных скоростных структур в перечисленных случаях и количественном описании их интегральных и локальных характеристик и в оценке эффективности использования явлений, возникающих при неоднородных течениях в постоянном магнитном поле в задачах управления потоками жидкого металла.

I. МГД-течения с различной электропроводностью стенок

МГД-течения в трубах с различной проводимостью стенок изучены теоретически и экспериментально в предельных ситуациях, когда магнитное поле параллельно или перпендикулярно проводящим частям периметра трубопроводов прямоугольного сечения. Шерклифом было сделано сообщение [30] о характере течения в прямоугольном канале с двумя проводящими короткозамкнутыми стенками в наклонном поперечном магнитном поле, который был найден Олти на основе приближенных оценок при больших числах Гартмана. Оказалось, что в таком течении образуется резко неоднородная скоростная структура со слоями в центральной части трубы, где и сосредотачивается основной расход жидкости, в то же время в остальной части трубы течение практически отсутствует.

В настоящей работе исследован случай, когда проводящие стенки не замкнуты внешней электрической цепью. В результате численного расчета ламинарного течения при числе Гартмана $Ha = 30$ показано, что и в этом случае магнитное поле формирует резко неоднородную скоростную структуру течения. Формы же существования этой структуры в условиях реального турбулентного течения и в сравнительно сильных магнитных по-

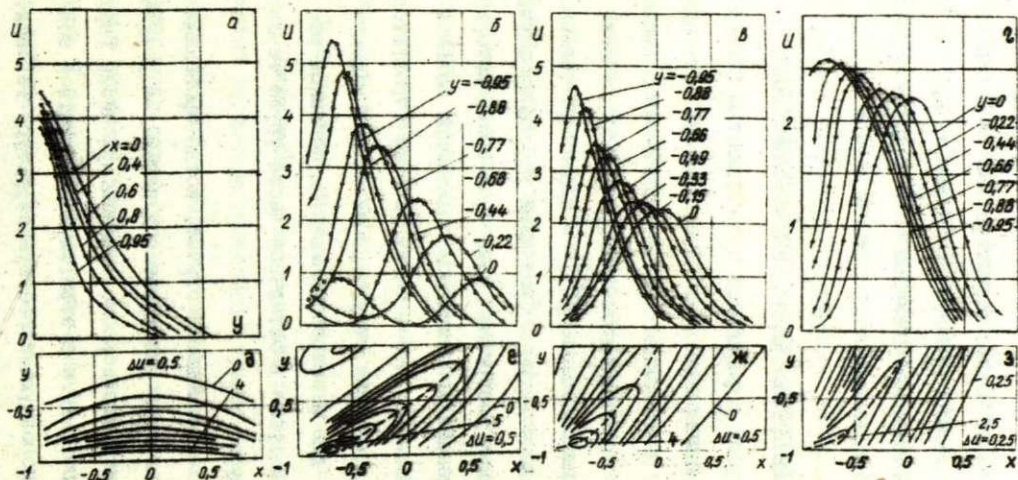


Рис. 1. Результаты экспериментального исследования профилей скорости в квадратной трубе с двумя проводящими стенками в наклонном магнитном поле. а, б, в, г, - профили скорости для углов наклона соответственно $\alpha = 0, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$; д, е, ж, з, - линии постоянной скорости (изотакхи). $Ha = 380, Re = 17200$. (Начало системы координат расположено в центре трубы, проводящие стенки параллельны оси y ; величина скорости отнесена к среднерасходной.)

дах ($Ha = 380$) были изучены экспериментально [1].

Структура течения с изменением угла наклона магнитного поля показана на рис. I. Если поле перпендикулярно проводящим стенкам ($\alpha = 0$), то основной расход жидкости сосредотачивается в слоях у непроводящих стенок (рис. I а, д). С увеличением угла α пристеночные слои отделяются от стенок и ориентируются вдоль поля (рис. I б, е). При угле $\alpha = 45^\circ$ оба слоя сливаются в один, направленный по диагонали трубы (рис. I в, ж), при дальнейшем увеличении угла неоднородности сглаживаются (рис. I г, з) вплоть до формирования практически однородного профиля при $\alpha = 90^\circ$.

С тем, чтобы оценить вклад отдельного электропроводного элемента в изменение скоростной структуры течения, экспериментально было исследовано течение в квадратной трубе с одной проводящей стенкой и найдено, что при пересечении магнитным полем электропроводного элемента стенки трубы образуется застойная зона с весьма незначительными скоростями, примыкающая к этому элементу и распространяющаяся вдоль магнитного поля [2]. Тем самым получена возможность качественного построения модели течения при различном расположении электропроводных элементов стенки трубы относительно направления магнитного поля.

Образование резко неоднородных скоростных структур приводит к резкому увеличению интенсивности турбулентности в такого рода течениях. Эксперименты по измерению пульсаций составляющих электрического поля в канале с двумя проводящими стенками при $\alpha = 45^\circ$ ($Ha = 380$, $Re = 17200$)

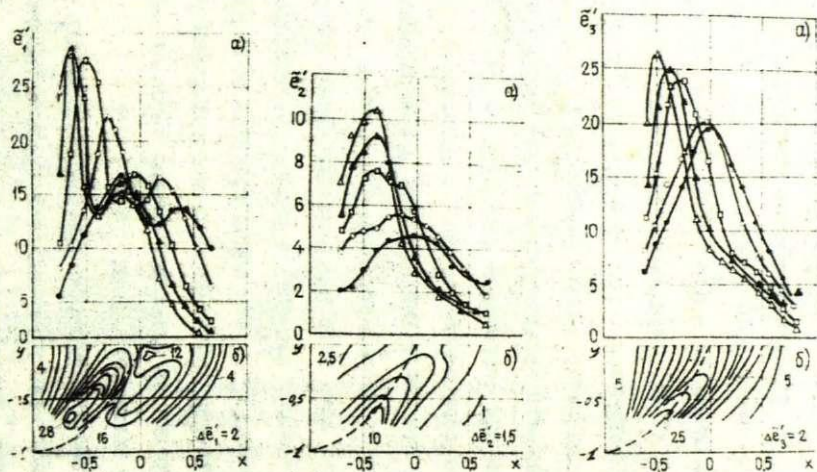


Рис. 2. Интенсивность пульсаций составляющих электрического поля при $NA = 380$. а - профили пульсаций: \bullet - $y = -0,06$; \circ - $y = -0,26$; \square - $y = -0,537$; \blacktriangle - $y = 0,657$; \triangle - $y = -0,74$; б - линии постоянного уровня пульсаций.

показали, что в отдельных точках поперечного сечения трубы (соответствующих точкам перегиба в профиле скорости) уровень пульсаций (рис. 2) достигает 25 - 28 % [3] , а при $Ha = 520$ даже 37 %. В таких высокотурбулизованных потоках должны резко интенсифицироваться процессы тепло- и массообмена.

С изменением угла наклона магнитного поля по отношению к проводящим стенкам квадратного канала существенно меняется также гидравлическое сопротивление канала. Как показали численный расчет и эксперимент с изменением угла наклона от 90° до 0 коэффициент сопротивления меняется на порядок. Это обстоятельство послужило основой создания эффективного регулятора расхода [6] .

При наличии проводящих стенок в трубе в жидкости индуцируются весьма значительные электрические токи, причем основная их доля замыкается по проводящим стенкам и диссипируется в джоулевый нагрев. Этот электрический ток может производить полезную работу, если вместо твердого проводника использовать жидкий проводник. Так если вторичный канал, который играет роль проводящей стенки для первичного канала, подключен к какому либо гидравлическому контуру, то при наличии течения в первичном канале движение возникает во вторичном контуре. Таким образом при помощи электродинамического взаимодействия (оба канала имеют общие проводящие шины, параллельные магнитному полю) можно осуществить передачу гидравлической энергии от одного контура к другому без физического контакта между жидкостями (при этом жидкости могут быть различные).

В диссертации проведен расчет эффективности такого электродинамического эжектора [7] в зависимости от геометрических размеров каналов эжектора, физических свойств эжектирующей и эжектируемой жидкостей и от параметра нагрузки вторичного контура. Расчет основывался на плоскопараллельной модели течения.

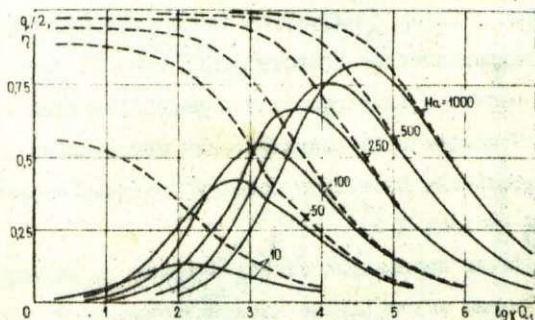


Рис. 3. Зависимость коэффициента эжекции (пунктирные кривые) и к.п.д. (сплошные кривые) от параметра нагрузки. Отношение размеров каналов равно двум.

На рис. 3 приведены зависимости коэффициента эжекции q (равного отношению расходов во вторичном и в первичном каналах) и коэффициента полезного действия передачи гидравлической энергии от одного контура к другому η (равного произведению отношения расходов и отношения давлений, развиваемого во вторичном канале и затрачиваемого в первичном канале эжектора) в зависимости от параметра

нагрузки для разных чисел Гартмана. С ростом Ha коэффициент эжекции стремится к предельному значению, равному отношению размеров каналов (вторичного к первичному) в направлении магнитного поля, причем тем медленнее, чем больше параметр нагрузки. Однако при малых значениях параметра нагрузки давление, развиваемое во вторичном канале, стремится к нулю с ростом Ha , вследствие чего коэффициент полезного действия эжектора падает.

Эксперименты, проведенные на ртутных контурах, показали хорошее совпадение результатов расчета и эксперимента. Оценки, проведенные для реальных жидкометаллических установок, показали эффективность такого способа эжектирования токопроводящих жидкостей, что позволяет использовать его для осуществления электродинамического сцепления между отдельными жидкометаллическими контурами и регулирования расхода в них.

2. МГД-течения с резкими изменениями границ поперечного сечения

Применение на практике трубопроводов с проводящими стенками для целей регулирования расхода не всегда возможно из-за высокой агрессивности жидких металлов, применение же трубопроводов с непроводящими стенками вынуждает использовать магнитные системы с большой длиной полюсов. В целях компактности устройства представляется целесообразным использовать для регулирования расхода различного рода местные сопротивления, образующиеся при резком изменении границ течения.

При исследовании МГД-течений с резкими изменениями границ течения наибольший интерес представляют течения в таких местных сопротивлениях, которые наиболее удобны с точки зрения технологии их изготовления и работы в тяжелых производственных условиях. К таким местным сопротивлениям в первую очередь относятся проточные тракты круглого поперечного сечения (внезапные круглые расширения, диафрагмы).

В диссертации экспериментальным путем найдены величины коэффициентов местных сопротивлений круглых внезапных расширений с различным отношением площадей широкой и узкой частей в широком диапазоне изменения числа Гартмана и Рейнольдса [4]. Для всех исследованных местных сопротивлений, как в экспериментах на ртути, так и на натрии, получена эмпирическая линейная зависимость относительного увеличения коэффициента местного сопротивления в магнитном поле от параметра МГД-взаимодействия:

$$\xi_B / \xi_0 = 1 + kN. \quad (1)$$

Для каждого местного сопротивления найдена величина коэффициента k в зависимости от отношения площадей широкой и узкой частей ω . Так для внезапных круглых расширений с $\omega = 2,78; 4$ и $6,5$ коэффициент k равен соответственно $0,109; 0,075$ и $0,023$, для диафрагм -

$$k \xi_0 = 0,15 \cdot \frac{\omega - 1}{\omega} \quad \text{при } \omega \leq 2,$$

$$k \xi_0 = (0,5 - 0,7\omega^{-1}) \cdot \frac{\omega - 1}{\omega} \quad \text{при } \omega \geq 2.$$

Линейная связь между коэффициентом сопротивления и параметром МГД-взаимодействия (1) оказалась весьма удобной

для анализа работы местного сопротивления в качестве регулятора расхода. В диссертации рассмотрены различные режимы регулирования расхода: при постоянном перепаде давления, поддерживаемом на участке регулирования, при изменяющемся напоре металла (по мере истечения его из емкости), при постоянной мощности насоса в замкнутой гидравлической системе.

Так для режима регулирования расхода при постоянном перепаде давления глубина регулирования $1-q$, где q есть отношение расхода при наложении поля к расходу в отсутствие поля ($q = Q_B / Q_0$), определяется положительным корнем квадратного уравнения [5] :

$$q^2 + N^* q - 1 = 0. \quad (2)$$

Параметр N^* , определяющий глубину регулирования, зависит от величины приложенного поля (через параметр МГД-взаимодействия, вычисленный по начальному расходу Q_0 в отсутствие поля), от вида местного сопротивления (от K и ξ_0) и от величины нерегулируемого сопротивления гидравлической системы ξ_H :

$$N^* = \frac{k \xi_0 N_0}{\xi_H + \xi_0}.$$

Экспериментальные регулировочные характеристики при регулировании натрия в замкнутом контуре с помощью диафрагм показаны на рис. 4. Там же сплошной линией приведена кривая определяемая положительным корнем уравнения (2).

Проведенные оценки эффективности регулирования расхода

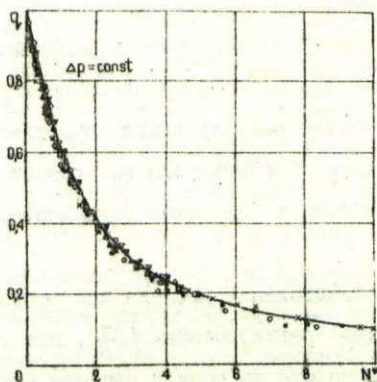


Рис. 4. Регулирование расхода натрия с помощью диафрагм в магнитном поле. (Точки, обозначенные \circ , \times , \square , \triangle , ∇ , \diamond , соответствуют диафрагмам с $\omega = 1; 1,2; 1,4; 1,7; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6$.)

для некоторых реальных установок показывают, что необходимый диапазон регулирования расхода может быть обеспечен при магнитных полях, достижимых с помощью электромагнитов промышленного производства.

При определении коэффициентов местных сопротивлений нужно было знать распределение давления по длине участка трубы, содержащего местное сопротивление. Измерения при течении ртути через внезапные круглые расширения показали, что распределение давления вблизи уступа, как в широкой, так и в узкой частях трубы не монотонно по длине трубы и не постоянно по периметру. Вблизи уступа внезапного расширения давление резко падает (как и в случае плоского внезапного расширения 4') и затем восстанавливается в широкой части, выходя на пьезомет-

рическую прямую, где уже давление постоянно по периметру. При чем при больших значениях параметра МГД-взаимодействия это восстановление происходит не монотонно (рис.5).

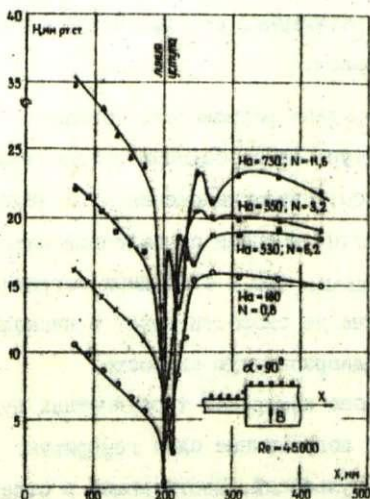


Рис. 5. Типичное распределение давления вблизи уступа круглого внезапного расширения при течении ртути. Отборы давления расположены в плоскости вектора индукции магнитного поля.

Столь сложная картина поля давлений означает во-первых, что потенциальные ямы будут служить препятствием для частиц, неизбежно имеющих в качестве примесей в жидком металле (в работе оценены размеры частиц, при которых последние не могут преодолеть потенциальный барьер). Во-вторых, зависимость давления от места положения отбора давления на периметре трубы должно играть важную роль в расходомерной

технике. Последнее обстоятельство проверено и подтверждено в экспериментах с расходомерными шайбами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы кратко можно сформулировать следующим образом:

1. Подтверждена возможность создания неоднородных скоростных структур со свободными пограничными слоями вдали от стенок труб; путем наложения наклонного магнитного поля на течение ртути в трубе с различной электропроводностью стенок. Показано, что в свободных пограничных слоях максимальное значение скорости может в несколько раз (4 + 6) превышать среднерасходную скорость.

2. На основе измерений турбулентных пульсаций найдено, что свободные пограничные слои генерируют высокий уровень турбулентных пульсаций, достигающий в отдельных точках 37 % от среднерасходной скорости.

3. Определены зависимости: коэффициента сопротивления труб с проводящими элементами от ориентации магнитного поля и местных сопротивлений от степени сужения тракта в магнитном поле.

4. Найденные зависимости использованы при разработке принципов регулирования расхода в гидравлических системах магнитным полем в различных условиях процесса регулирования.

5. При изучении поля давлений обнаружено формирование в магнитном поле потенциальных ям и неравномерность распределения давления по периметру местного сопротивления.

6. Показана достаточно приемлемая эффективность использования постоянного магнитного поля для целей управления скоростной структурой течения, уровнем турбулентности, в задачах управления расходом жидкого металла, эжектирования проводящей жидкости, в расходомерной технике.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- 1^о. Верте Л.А. Электромагнитная разливка и обработка жидкого металла. "Металлургия", 1967.
- 2^о. Технические проблемы реакторов на быстрых нейтронах. под ред. Багдасарова П.Е. М., Атомиздат, 1969. *
- 3^о. Шерклиф Дж. А. Исследования по магнитной гидродинамике и электромагнитному измерению расхода, проводимые в Уорвикском университете. (Англия). МГ, 1967, 4, 17.
- 4^о. Брановер Г.Г., Васильев А.С., Гельфгат Ю.М. Исследование влияния поперечного магнитного поля на течение ртути с внезапным расширением., МГ, 1967, 3, 99.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Буцениекс И.Э., Витолдзиньс Г.А., Гельфгат Ю.М., Дорофеев В.С., Щербинин Э.В. МГД-течение в квадратной трубе со стенками различной электропроводности в наклонном поперечном магнитном поле. МГ, 1971, 3, 53.
2. Буцениекс И.Э., Щербинин Э.В. Об МГД-течении в трубах с различной электропроводностью стенок в наклонном поперечном магнитном поле. МГ, 1971, 4, 148.
3. Буцениекс И.Э., Слюсарев Н.М., Щербинин Э.В. Турбулентные пульсации в свободных пограничных слоях при равномерном МГД-течении в трубе. МГ, 1972, 3, 135.
4. Буцениекс И.Э., Гельфгат Ю.М., Гудков А.Л., Щербинин Э.В., Определение коэффициента сопротивления труб с резкими

изменениями площади поперечного сечения в магнитном поле.
МГ, 1972, 3, 51.

5. Буценнекс И.Э., Гельфгат Ю.М., Гудков А.Л., Шербинин Э.В.,
Регулирование расхода в гидравлических системах постоян-
ным магнитным полем. МГ, 1972, 4, 127.
6. Буценнекс И.Э., Гельфгат Ю.М., Дорофеев В.С., Шербинин Э.В.,
Устройство для регулирования расхода токопроводящих жид-
костей с помощью магнитного поля. Авт. свид. № 349985, Офи-
циальный бюллетень Комитета по делам изобретений и откры-
тий при Совете Министров СССР, 1972, 26.
7. Буценнекс И.Э., Шербинин Э.В. Электродинамический эжектор.
МГ, 1973, 2, 55.

Отдельные части содержания диссертации докладывались на
седьмом Рижском совещании по магнитной гидродинамике.

ИФ АН ЛССР, Саласпилс,
№ 159, ЯТ 02257, т. 200,
8. X. 1973.