

PROCEEDINGS SERIES

PLASMA PHYSICS
AND CONTROLLED
NUCLEAR FUSION RESEARCH
1971

PROCEEDINGS OF THE
FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PLASMA PHYSICS
AND CONTROLLED NUCLEAR FUSION RESEARCH
HELD BY THE
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
AT MADISON, USA, 17-23 JUNE 1971

In three volumes

VOL. II

PROCEEDINGS SERIES

PLASMA PHYSICS
AND CONTROLLED
NUCLEAR FUSION RESEARCH
1971

PROCEEDINGS OF THE
FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PLASMA PHYSICS
AND CONTROLLED NUCLEAR FUSION RESEARCH
HELD BY THE
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
AT MADISON, USA, 17-23 JUNE 1971

In three volumes

VOL. II

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
VIENNA, 1971

**PLASMA PHYSICS
AND CONTROLLED
NUCLEAR FUSION RESEARCH
1971**

The following States are Members of the International Atomic Energy Agency:

AFGHANISTAN	GHANA	NORWAY
ALBANIA	GREECE	PAKISTAN
ALGERIA	GUATEMALA	PANAMA
ARGENTINA	HAITI	PARAGUAY
AUSTRALIA	HOLY SEE	PERU
AUSTRIA	HUNGARY	PHILIPPINES
BELGIUM	ICELAND	POLAND
BOLIVIA	INDIA	PORTUGAL
BRAZIL	INDONESIA	ROMANIA
BULGARIA	IRAN	SAUDI ARABIA
BURMA	IRAQ	SENEGAL
BYELORUSSIAN SOVIET	IRELAND	SIERRA LEONE
SOCIALIST REPUBLIC	ISRAEL	SINGAPORE
CAMEROON	ITALY	SOUTH AFRICA
CANADA	IVORY COAST	SPAIN
CEYLON	JAMAICA	SUDAN
CHILE	JAPAN	SWEDEN
CHINA	JORDAN	SWITZERLAND
COLOMBIA	KENYA	SYRIAN ARAB REPUBLIC
CONGO, DEMOCRATIC	KHMER REPUBLIC	THAILAND
REPUBLIC OF	KOREA, REPUBLIC OF	TUNISIA
COSTA RICA	KUWAIT	TURKEY
CUBA	LEBANON	UGANDA
CYPRUS	LIBERIA	UKRAINIAN SOVIET SOCIALIST
CZECHOSLOVAK SOCIALIST	LIBYAN ARAB REPUBLIC	REPUBLIC
REPUBLIC	LIECHTENSTEIN	UNION OF SOVIET SOCIALIST
DENMARK	LUXEMBOURG	REPUBLICS
DOMINICAN REPUBLIC	MADAGASCAR	UNITED KINGDOM OF GREAT
ECUADOR	MALAYSIA	BRITAIN AND NORTHERN
EGYPT, ARAB REPUBLIC OF	MALI	IRELAND
EL SALVADOR	MEXICO	UNITED STATES OF AMERICA
ETHIOPIA	MONACO	URUGUAY
FINLAND	MOROCCO	VENEZUELA
FRANCE	NETHERLANDS	VIET-NAM
GABON	NEW ZEALAND	YUGOSLAVIA
GERMANY, FEDERAL REPUBLIC OF	NIGER	ZAMBIA
	NIGERIA	

The Agency's Statute was approved on 23 October 1956 by the Conference on the Statute of the IAEA held at United Nations Headquarters, New York; it entered into force on 29 July 1957. The Headquarters of the Agency are situated in Vienna. Its principal objective is "to accelerate and enlarge the contribution of atomic energy to peace, health and prosperity throughout the world".

FOREWORD

The ultimate goal of controlled nuclear fusion research is to make a new energy source available to mankind, a source that will be virtually unlimited and that gives promise of being environmentally cleaner than the sources currently exploited. This goal has stimulated research in plasma physics over the past two decades, leading to significant advances in the understanding of matter in its most common state as well as to progress in the confinement and heating of plasma. An indication of this progress is that in several countries considerable effort is being devoted to design studies of fusion reactors and to the technological problems that will be encountered in realizing these reactors.

This range of research, from plasma physics to fusion reactor engineering, is shown in the present three-volume publication of the Proceedings of the Fourth Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research. The Conference was sponsored by the International Atomic Energy Agency and was held in Madison, Wisconsin, USA from 17 to 23 June 1971. The enthusiastic co-operation of the University of Wisconsin and of the United States Atomic Energy Commission in the organization of the Conference is gratefully acknowledged. The Conference was attended by over 500 scientists from 24 countries and 3 international organizations, and 143 papers were presented. These papers are published here in the original language; English translations of the Russian papers will be published in a Special Supplement to the journal Nuclear Fusion.

The series of conferences on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research has become a major international forum for the presentation and discussion of results in this important and challenging field. In addition to sponsoring these conferences, the International Atomic Energy Agency supports controlled nuclear fusion research by publishing the journal Nuclear Fusion, and has recently established an International Fusion Research Council. The primary aim of this Council, which had its first meeting in conjunction with the Madison Conference, is to promote international co-operation in controlled nuclear fusion research and its application. By these activities the International Atomic Energy Agency hopes to contribute significantly to the attainment of controlled fusion power.

EDITORIAL NOTE

The papers and discussions incorporated in the proceedings published by the International Atomic Energy Agency are edited by the Agency's editorial staff to the extent considered necessary for the reader's assistance. The views expressed and the general style adopted remain, however, the responsibility of the named authors or participants.

For the sake of speed of publication the present Proceedings have been printed by composition typing and photo-offset lithography. Within the limitations imposed by this method, every effort has been made to maintain a high editorial standard; in particular, the units and symbols employed are to the fullest practicable extent those standardized or recommended by the competent international scientific bodies.

The affiliations of authors are those given at the time of nomination.

The use in these Proceedings of particular designations of countries or territories does not imply any judgement by the Agency as to the legal status of such countries or territories, of their authorities and institutions or of the delimitation of their boundaries.

The mention of specific companies or of their products or brand-names does not imply any endorsement or recommendation on the part of the International Atomic Energy Agency.

HOW TO ORDER IAEA PUBLICATIONS

Exclusive sales agents for IAEA publications, to whom all orders and inquiries should be addressed, have been appointed in the following countries:

UNITED KINGDOM Her Majesty's Stationery Office, P.O. Box 569, London S.E.1
UNITED STATES OF AMERICA UNIPUB, Inc., P.O. Box 433, New York, N.Y. 10016

In the following countries IAEA publications may be purchased from the sales agents or booksellers listed or through your major local booksellers. Payment can be made in local currency or with UNESCO coupons.

ARGENTINA	Comisión Nacional de Energía Atómica, Avenida del Libertador 8250, Buenos Aires
AUSTRALIA	Hunter Publications, 23 McKillop Street, Melbourne, C.1
BELGIUM	Office International de Librairie, 30, avenue Marnix, Brussels 5
CANADA	Information Canada, Ottawa
C.S.S.R.	S.N.T.L., Spálená 51, Prague 1
	Alfa, Publishers, Hurbanovo námestie 6, Bratislava
FRANCE	Office International de Documentation et Librairie, 48, rue Gay-Lussac, F-75 Paris 5 ^e
HUNGARY	Kultura, Hungarian Trading Company for Books and Newspapers, P.O.Box 149, Budapest 62
INDIA	Oxford Book and Stationery Comp., 17, Park Street, Calcutta 16 Prakash Publishers, Film Colony, Chaura Rasta, Jaipur-3 (Raj.)
ISRAEL	Heiliger and Co., 3, Nathan Strauss Str., Jerusalem
ITALY	Agenzia Editoriale Commissionaria, A.E.I.O.U., Via Meravigli 16, I-20123 Milan
JAPAN	Maruzen Company, Ltd., P.O.Box 5050, 100-31 Tokyo International
NETHERLANDS	Martinus Nijhoff N.V., Lange Voorhout 9-11, P.O.Box 269, The Hague
PAKISTAN	Mirza Book Agency, 65, The Mall, P.O.Box 729, Lahore-3
POLAND	Ars Polona, Centrala Handlu Zagranicznego, Krakowskie Przedmiescie 7, Warsaw
ROMANIA	Cartimex, 3-5 13 Decembrie Street, P.O.Box 134-135, Bucarest
SOUTH AFRICA	Van Schaik's Bookstore, P.O.Box 724, Pretoria Universitas Books (Pty) Ltd., P.O.Box 1557, Pretoria
SWEDEN	C.E.Fritzes Kungl. Hovbokhandel, Fredsgatan 2, Stockholm 16
U.S.S.R.	Mezhdunarodnaya Kniga, Smolenskaya-Sennaya 32-34, Moscow G-200
YUGOSLAVIA	Jugoslovenska Knjiga, Terazije 27, Belgrade

Orders from countries where sales agents have not yet been appointed and requests for information should be addressed directly to:



Publishing Section,
International Atomic Energy Agency,
Kärntner Ring 11, P.O.Box 590, A-1011 Vienna, Austria

CONTENTS OF VOL. II

TURBULENCE (Session E)

Прогресс в исследовании турбулентного нагрева плазмы (IAEA-CN-28/E-1)	3
Е.К. Завойский, Б.А. Демидов, Ю.Г. Калинин, А.Г. Плахов, Л.И. Рудаков, В.Д. Русанов, В.А. Скорюпин, Г.Е. Смолкин, А.В. Титов, С.Д. Фанченко, В.В. Шапкин и Г.В. Шолин	
New results in turbulent heating (IAEA-CN-28/E-2)	25
C. Wharton, P. Korn, D. Prono, S. Robertson, P. Auer and C.T. Dum	
Experiments on plasma heating by the dissipation of current-driven turbulence (IAEA-CN-28/E-3).....	37
S.M. Hamberger, J. Jancarik, L.E. Sharp, D.A. Aldcroft and A. Wetherell	
Turbulent resistivity, diffusion and heating (IAEA-CN-28/E-4)	55
B.D. Fried, C.F. Kennel, K. Mackenzie, F.V. Coroniti, J.M. Kindel, R. Stenzel, R.J. Taylor, R. White, A.Y. Wong, W. Bernstein, J.M. Sellen, Jr., D. Forslund and R.Z. Sagdeev	
Turbulent heating of a plasma column in a linear discharge (IAEA-CN-28/E-5)	67
H. de Kluiver, H.W. Piekaar, W.R. Rutgers, H. Schrijver and B. de Groot	
Эксперименты с плотной турбулентно нагретой плазмой в огре-2Т (IAEA-CN-28/E-6)	75
В.А. Жильцов, А.Н. Кархов, В.Х. Лихтенштейн и Д.А. Панов	
Нагрев и удержание высокоплотной горячей плазмы в пробкотроне (IAEA-CN-28/E-7)	85
Н.А. Манзук, Н.И. Рева, В.А. Супруненко, Е.А. Сухомлин, А.М. Тернопол и В.Т. Толок	
Флуктуирующие электрические поля в турбулентной плазме (IAEA-CN-28/E-8)	99
А.Б. Березин, Л.В. Дубовой и Б.В. Люблин	
Discussion to papers IAEA-CN-28/E-2, E-3, E-5, E-6, E-7, E-8	111
Экспериментальные исследования нелинейных эффектов при взаимодействии нерелятивистских и релятивистских пучков с плазмой (IAEA-CN-28/E-9)	113
А.С. Бакай, А.К. Березин, Г.П. Березина, Л.И. Болотин, А.М. Егоров, Н.С. Ерохин, В.П. Зейдлиц, Б.И. Иванов, А.Н. Измайллов, А.Ф. Кившик, В.А. Киселев, О.Ф. Ковпик, Е.А. Корнилов, Ю.Е. Коляда, С.М. Криворучко, В.И. Курилко, Е.И. Луценко, Н.С. Педенко, Л.А. Митин, С.С. Моисеев, А.П. Толстолужский, Я.Б. Файнберг, В.Д. Шапиро и В.И. Шевченко	

Экспериментальное исследование бесстолкновительной релаксации ионных потоков в плазме (IAEA-CN-28/E-10)	141
А.Г. Борисенко, Г.С. Кириченко и В.Г. Хмарук	
Some non-linear phenomena associated with high-frequency beam-plasma instabilities (IAEA-CN-28/E-11)	155
V. Piffli, P. Šunka, J. Ullschmied, K. Jungwirth and L. Krlín	
Discussion to papers IAEA-CN-28/E-9, E-10, E-11	165
Theory of strong trapped-particle turbulence (IAEA-CN-28/E-12)	167
W.E. Drummond, J.R. Thompson, M.L. Sloan and H.V. Wong	
Нелинейная теория взаимодействия релятивистских и нерелятивистских пучков с плазмой. Нелинейная теория трансформации волн (IAEA-CN-28/E-13)	195
Н.С. Ерохин, В.И. Курилко, М.Б. Левин, М.Г. Любарский, Н.Г. Мациборко, С.С. Моисеев, И.Н. Онищенко, А.П. Толстолужский, Я.Б. Файнберг, В.Д. Шапиро и В.И. Шевченко	
Discussion to papers IAEA-CN-28/E-12, E-13	219
Understanding turbulent ion heating in the Oak Ridge mirror machine, "Burnout V" (IAEA-CN-28/E-14)	221
I. Alexeff, L.A. Berry, J.M. Dudley, K.G. Estabrook, A. Hirose, W.D. Jones, R.V. Neidigh, J.N. Olsen, F.R. Scott, W.L. Stirling, M.M. Widner and W.R. Wing	
Discussion	232
Механизм турбулентного нагрева и потерь в токамаках (IAEA-CN-28/E-15)	235
Л.И. Рудаков	
Turbulence in confined plasmas at high electric fields (IAEA-CN-28/E-16)	247
A. Bers, B. Coppi, T. Dupree, R. Kulsrud and F. Santini	
Computer simulation of anomalous resistance (IAEA-CN-28/E-17) ..	265
D. Biskamp and R. Chodura	
Theory of turbulent heating and anomalous diffusion in pinch plasmas (IAEA-CN-28/E-18)	277
D. Forslund, R. Morse and C. Nielson	
Discussion to papers IAEA-CN-28/E-17, E-18	291
Новые результаты исследований аномального сопротивления плазмы (IAEA-CN-28/E-19)	293
Г.Е. Векштейн, Д.Д. Рютов и Р.З. Сагдеев	
Бесстолкновительная релаксация ультрарелятивистского электронного пучка в плазме (IAEA-CN-28/E-20)	309
А.Т. Алтынцев, Б.Н. Брейзман, А.Г. Еськов, О.А. Золотовский, В.И. Коротеев, Р.Х. Куртмуллаев, В.Л. Масалов, Д.Д. Рютов и В.Н. Семенов	
Энергетический баланс и динамика нагрева плазмы пучком электронов, ускоряемых в сильноточном прямом разряде (IAEA-CN-28/E-21)	325
А.И. Карчевский и Ю.И. Страхов	

Динамика нагрева плазмы в бесстолкновительных ударных волнах большой амплитуды (IAEA-CN-28/E-22)	345
Д.Г. Ломинадзе и А.Д. Патарая	

ТОКАМАКС II (Session F)

Implication of pseudo-classical diffusion for toroidal confinement devices (IAEA-CN-28/F-1)	357
S. Yoshikawa and N.C. Christofilos	
Anomalous contribution of low-frequency, long-wavelength fluctuations to spatial plasma diffusion in a magnetic field (IAEA-CN-28/F-2)	373
S. Ichimaru and M.N. Rosenbluth	
Discussion to papers IAEA-CN-28/F-1, F-2	381
Development of ambipolar electric field and flows in toroidal plasmas (IAEA-CN-28/F-3)	383
T.E. Stringer	
Rotating toroidal equilibria and shocks (IAEA-CN-28/F-4)	393
N.K. Winsor, E.C. Bowers, M.A. Hellberg and J.M. Dawson	
Исследование макроскопических неустойчивостей плазменного шнура в Токамаке (IAEA-CN-28/F-5)	401
С.В. Мирнов и И.Б. Семенов	
О радиационных потерях в некоторых термоядерных системах (IAEA-CN-28/F-6)	407
Ю.И. Галушкин, В.И. Гервидс и В.И. Коган	
Discussion to papers IAEA-CN-28/F-5, F-6	423
Stability experiments on the ST Tokamak (IAEA-CN-28/F-7)	425
J.C. Hosea, C. Bobeldijk and D.J. Grove	
Discussion	440
Эксперименты на установке Токамак-6 (IAEA-CN-28/F-8)	441
Н.Д. Виноградова, В.С. Власенков, Е.П. Горбунов, В.М. Леонов, В.С. Мухоматов, М.П. Петров и Л.Д. Синицына	
Discussion	449
Collective modes in high-current-carrying confined plasmas (IAEA-CN-28/F-9)	451
J. Callen, B. Coppi, R. Dagazian, R. Gajewski and D. Sigmar	
Discussion	477
Стационарный токамак (IAEA-CN-28/F-10)	479
Б.Б. Кадомцев и В.Д. Шафранов	
Discussion	488
Equilibrium and MHD-stability in Tokamak and hybrid systems (IAEA-CN-28/F-11)	491
J.D. Jukes and F.A. Haas	
Equilibre, stabilité et diffusion d'un plasma torique à section transversale non circulaire (IAEA-CN-28/F-12)	507
G. Laval, H. Luc, E.K. Maschke, C. Mercier et R. Pellat	

Удержание плазмы в токамаке с $\beta_1 \gg 1$ при произвольном распределении тока (IAEA-CN-28/F-13)	519
В.Д. Шафранов и Э.И. Юрченко	
Discussion to papers IAEA-CN-28/F-11, F-12, F-13	527
MHD-stability of axisymmetric plasmas (IAEA-CN-28/F-14)	529
G. Küppers, D. Priirsch and H. Tasso	
Modes de dérive dissipatifs dans les configurations du type Tokamak (IAEA-CN-28/F-15)	539
J.C. Adam, G. Laval et R. Pellat	
Non-linear kink and tearing mode effects in Tokamaks (IAEA-CN-28/F-16)	553
P.H. Rutherford, H.P. Furth and M.N. Rosenbluth	
Discussion to papers IAEA-CN-28/F-14, F-15, F-16	571

OPEN CONFINEMENT SYSTEMS (Session G)

Expérience de confinement d'un plasma dans un puits magnétique circularisé: Deca II B (IAEA-CN-28/G-1)	575
D. Launois, P. Lecoustey, M. Nicolas, J. Tachon et J. Kesner	
Formation de plasma par injection et dissociation de granions d'hydrogène accélérés (IAEA-CN-28/G-2)	585
F. Bottiglioni, J. Coutant, M. Foïs et F. Prevot	
Confinement d'un plasma chauffé par impulsion dans un puits magnétique octopolaire (IAEA-CN-28/G-3)	595
J. Jacquinet, C. Leloup, J.P. Poffe, M. De Pretis et P. Evrard	
High-beta relativistic electron plasmas in axisymmetric and non-axisymmetric mirrors (IAEA-CN-28/G-4)	607
R.A. Dandl, H.O. Eason, P.H. Edmonds, A.C. England, G.E. Guest, C.L. Hedrick, J.T. Hogan and J.C. Sprott	
Discussion	617
Use of a hot-electron target plasma for accumulation of energetic ions in stabilized magnetic mirror traps (IAEA-CN-28/G-5)	619
W.B. Ard, R.A. Blanken, R.J. Colchin, J.L. Dunlap, G.E. Guest, G.R. Haste, C.L. Hedrick, N.H. Lazar, J.F. Lyon and D.J. Sigmar	
Discussion	628
Développements récents de la machine Pléiade (IAEA-CN-28/G-6)	631
R. Geller, B. Jacquot et C. Jacquot	
Исследование распада плазмы в адиабатической ловушке ПР-6 (IAEA-CN-28/G-7)	647
Ю.Т. Байбородов, М.С. Иоффе, Б.И. Канаев, Р.И. Соболев и Е.Е. Юшманов	
Исследование ионной циклотронной неустойчивости плазмы, созданной быстрыми ионами в ловушке с магнитными пробками (IAEA-CN-28/G-8)	663
А.В. Бортников, Н.Н. Бревнов, В.Г. Жуковский, В.И. Пергамент и М.К. Романовский	

Возможный метод получения столкновительной плазмы в ловушке с пробками (IAEA-CN-28/G-9)	679
И.Н. Головин, К.Б. Карташев, В.И. Пистунович, В.В. Платонов, В.Д. Рютов и Е.А. Филимонова	
Experimental and theoretical investigation of plasma build-up and microinstabilities in a neutral-injection mirror machine (IAEA-CN-28/G-10)	689
E. Thompson, J.G. Cordey and D.R. Sweetman	
Discussion	706
Plasma production by neutral beam injection in mirror systems (IAEA-CN-28/G-11).....	707
K.H. Berkner, W.S. Cooper, C.C. Damm, K.W. Ehlers, A.H. Futch, G.W. Hamilton, J.E. Osher and R.V. Pyle	
Discussion	718
Plasma containment in the LRL-2X-experiment (IAEA-CN-28/G-12)	721
F.H. Coensgen, W.F. Cummins, V.A. Finlayson, W.E. Nexsen, Jr. and T.C. Simonen	
Discussion	733
Loss-cone modes in inhomogeneous mirror machines (IAEA-CN-28/G-13)	735
D.E. Baldwin, C.O. Beasley, Jr., H.L. Berk, W.M. Farr, R.C. Harding, J.E. McCune, L.D. Pearlstein and A. Sen	
Discussion	755
Chairmen of Sessions and Secretariat of Conference	757

TURBULENCE
(Session E)

Chairman: J.B. TAYLOR

Papers E-2, E-3 and E-5 to E-8 were presented by
C. WHARTON as Rapporteur

Papers E-9 to E-11 were presented by
P. ŠUNKA as Rapporteur

Papers E-12 and E-13 were presented by
W.E. DRUMMOND as Rapporteur

Papers E-15, E-16 and E-22 were presented by
L.I. RUDAKOV as Rapporteur

Papers E-17 and E-18 were presented by
D. BISKAMP as Rapporteur

Papers E-19 to E-21 were presented by
A.A. GALEEV as Rapporteur

ПРОГРЕСС В ИССЛЕДОВАНИИ ТУРБУЛЕНТНОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ

Е. К. ЗАВОЙСКИЙ, Б. А. ДЕМИДОВ, Ю. Г. КАЛИНИН,
А. Г. ПЛАХОВ, Л. И. РУДАКОВ, В. Д. РУСАНОВ,
В. А. СКОРЮПИН, Г. Е. СМОЛКИН, А. В. ТИТОВ,
С. Д. ФАНЧЕНКО, В. В. ШАПКИН, Г. В. ШОЛИН
Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова,
Москва,
Союз Советских Социалистических Республик

Abstract — Аннотация

ADVANCES IN RESEARCH ON TURBULENT HEATING OF A PLASMA.

New experimental data are presented on turbulent heating and on the magnetic confinement of turbulently heated plasma. The physical state of the plasma has been investigated under conditions of turbulent heating by a current, shock waves and an electron beam. In the NPR-2 device the change with time has been studied of an epithermal ultra-high-frequency radiation spectrum, and the Stark profiles of the optical spectral lines have been analysed. The results confirm the ion-acoustic mechanism of anomalous resistance of the plasma. The strong anisotropy of the turbulent ion-acoustic oscillations is demonstrated. The energy distribution of the ions during turbulent heating of the plasma by the direct discharge current has been measured in the TN-5 device. In the "Vikhr-2" toroidal trap the relationship has been investigated between the anomalous resistance of the plasma and the mass of the ions. In the T-2M toroidal trap an investigation has been carried out of turbulent heating by a current pulse, the direction of which coincides with that of the quasi-stationary current. Anomalous resistance occurs when $U/C_s \gg 6$ and is caused by ion-acoustic excitation. New data on the confinement of turbulently heated plasma have been obtained with the "Vikhr-3" toroidal device. On the basis of the Stark broadening of the spectral lines of hydrogen and helium in UV-2 it was established that upon the passage of a shock wave intense electric oscillations are caused at ion-acoustic and lower frequencies. A method of electron-optical analysis of the Stark profiles of the spectral lines was also applied in an experiment on the interaction of an electron beam with the plasma in the PN-2 device, which showed that an electron beam caused intense Langmuir oscillations in the plasma.

ПРОГРЕСС В ИССЛЕДОВАНИИ ТУРБУЛЕНТНОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ.

Приводятся новые экспериментальные данные о турбулентном нагреве и магнитном удержании турбулентно нагретой плазмы. Исследовано физическое состояние плазмы в условиях турбулентного нагрева током, ударными волнами и электронным пучком. На установке ННР-2 изучено изменение во времени спектра надтеплового СВЧ-излучения и проанализированы штарковские профили оптических спектральных линий. Результаты подтверждают ионно-звуковой механизм аномального сопротивления плазмы. Обнаружена сильная анизотропия турбулентных ионно-звуковых колебаний. Энергетическое распределение ионов при турбулентном нагреве плазмы током прямого разряда измерено на установке ТН-5. В тороидальной ловушке "Вихрь-2" исследована зависимость аномального сопротивления плазмы от массы ионов. В тороидальной ловушке Т-2М исследован турбулентный нагрев импульсом тока, совпадающим по направлению с квазистационарным током. Аномальное сопротивление возникает при условии $(U/C_s) \gg 6$ и объясняется возбуждением ионного звука. Новые данные об удержании турбулентно нагретой плазмы получены на тороидальной установке "Вихрь-3". По штарковскому уширению спектральных линий водорода и гелия на установке УВ-2 обнаружено, что при прохождении ударной волны возбуждаются интенсивные электрические колебания на ионно-звуковой и более низких частотах. Методика электронно-оптического анализа штарковских профилей спектральных линий была применена также в эксперименте по взаимодействию электронного пучка с плазмой на установке ПН-2 и показала, что электронный пучок возбуждает в плазме интенсивные ленгмювские колебания.

ВВЕДЕНИЕ

В 1961 году, когда исследования управляемого термоядерного синтеза были омрачены появлением все новых и новых неустойчивостей, препятствующих удержанию плазмы в магнитных ловушках, в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова было высказано предложение возбуждать в плазме мелкомасштабные неустойчивости для ее эффективного нагрева [1]. Так были начаты исследования турбулентного нагрева плазмы, т. е. трансформации упорядоченного движения частиц плазмы в хаотическое тепловое за счет диссипации энергии на турбулентных пульсациях, возбуждаемых этим упорядоченным движением. За истекшее время возможность эффективного "бесстолкновительного" нагрева плазмы, отвечающего формуле турбулентного нагрева, была подтверждена в самых разнообразных постановках эксперимента, где роль упорядоченного движения электронов играл электрический ток в плазме, текущий вдоль или поперек магнитного поля. Ко второму случаю относится нагрев плазмы интенсивной магнитно-звуковой волной или ударной волной, аннигиляция встречных магнитных полей [1-3]. К первому — нагрев током прямого разряда в зеркальных магнитных ловушках [4] и током, текущим вдоль обхода плазменного шнура в замкнутых системах [5,6]. Тесно примыкает сюда нагрев плазмы вводимым извне электронным пучком [7] и аномальный ВЧ-нагрев (в том числе нагрев ионов магнитно-звуковыми волнами малой амплитуды и электронно-циклотронный нагрев в сильных переменных полях [8,9]). Таким образом, турбулентный нагрев в настоящее время охватывает широкий класс экспериментов, объединяемых между собой по тому признаку, что диссипация энергии внешнего электромагнитного поля в плазме происходит не за счет парных кулоновских, а за счет коллективных взаимодействий. Прогресс в столь широкой области исследований связан, с одной стороны, с установлением общих закономерностей для явлений, которые могут существенно различаться в деталях, с другой стороны — в детальном анализе отдельных частных случаев с теоретическим объяснением всех особенностей механизма явления. Общие феноменологические закономерности турбулентного нагрева были установлены на предыдущих этапах исследований [1,5,6,10-16]. Было выявлено следующее:

1) Возбуждение током неустойчивости с характерным размером масштаба дебаевского радиуса позволяет нагреть плазму с плотностью до $10^{11} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$ до температуры $10^3 - 10^4 \text{ эВ}$ за время, меньшее одного кулоновского столкновения.

2) При достаточно коротком времени нагрева эффект повышения диссипации энергии на турбулентных пульсациях значительно превосходит эффект дополнительных потерь.

3) После прекращения нагрева мелкомасштабная турбулентность настолько быстро затухает, что возможности дальнейшего удержания нагретой плазмы определяются только свойствами соответствующей магнитной ловушки.

4) Эффективность турбулентного нагрева велика, достигая в отдельных опытах 30-50% даже при температурах порядка $10^3 - 10^4 \text{ эВ}$.

5) В условиях турбулентного нагрева удельное сопротивление плазмы аномально велико и определяется уровнем мелкомасштабной турбулентности.

6) Эффект убегания электронов в условиях турбулентного нагрева не наблюдается, хотя электрическое поле в плазме в тысячи раз превышает предел Драйзера.

После выяснения общих закономерностей большое значение для прогресса исследований турбулентного нагрева и, в частности, для развития теории имеет детальное исследование микроскопической картины турбулентного состояния плазмы в конкретных экспериментах. В данном докладе приводятся новые результаты по исследованию механизма турбулентного нагрева плазмы током на установках ННР-2, ТН-5, Вихрь-2, Тор-4М при плотности плазмы $10^{12} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и напряженности внешнего электрического поля $10-400 \text{ В/см}$. В этих опытах, помимо общеупотребительных, использованы специальные виды диагностики, разработанные для этих исследований. Результаты исследования турбулентного нагрева плазмы током, текущим вдоль магнитного поля, сопоставлялись с показаниями тех же средств диагностики в опытах по нагреву плазмы бесстолкновительной ударной волной (установка УВ-2) и электронным пучком (установка ПН-2). В докладе рассмотрено развитие теории турбулентного нагрева.

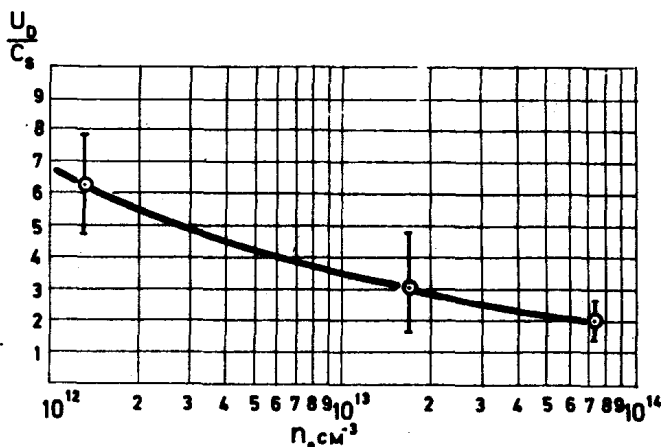


Рис. 1. Зависимость отношения токовой скорости электронов U_D к скорости ионного звука C_s от плотности плазмы в открытой магнитной ловушке ННР-2.

Условия опыта: водородная плазма, напряжение на емкости прямого разряда $V_c = 24 \text{ кВ}$, магнитное поле $H_0 = 10 \text{ кэ}$.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Дрейфовая скорость электронов при турбулентном нагреве током.

Величина дрейфовой скорости электронов U_D определялась из осциллограмм тока в плазме, полученных с помощью пояса Роговского, и данных о плотности плазмы, полученных с помощью СВЧ-интерферометров. Хотя измерение тока может быть сделано с высокой точностью, пространственное распределение плотности может вносить в радиоинтерферометрические измерения неопределенность порядка фактора 2. На рис. 1 приво-