

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. III

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. III

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

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".

Printed by the IAEA in Austria

December 1971

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.

PLASMA PHYSICS AND CONTROLLED NUCLEAR FUSION RESEARCH 1971
IAEA, VIENNA, 1971
STI/PUB/288

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 Atomica, 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. III

CLOSED CONFINEMENT SYSTEMS (Session H)

Поведение плазмы в стеллараторе при больших длинах свободного пробега электронов (IAEA-CN-28/H-1)	3
В. Н. Бочаров, В. И. Волосов, А. В. Комин, В. М. Панасюк и Ю. Н. Юдин	
Исследование удержания плазмы в стеллараторе TOP-1 (IAEA-CN-28/H-2)	21
Д. К. Акулина, Э. Д. Андрухина, Ю. И. Нечаев, О. И. Федянин и Ю. В. Хольнов	
Particle-confinement minima in the Wendelstein II-a-Stellarator (IAEA-CN-28/H-3)	37
G. Grieger, W. Ohlendorf, H.D. Pacher, H. Wobig and G.H. Wolf	
Discussion	48
Экспериментальное исследование квазистационарных продольных потоков ионов в стеллараторе Л-1 (IAEA-CN-28/H-4)	49
М. С. Бережецкий, С. Е. Гребенщиков, И. А. Косый, И. С. Сбитникова и И. С. Шпигель	
Удержание плазмы в двухзаходном стеллараторе при резонансных значениях угла вращательного преобразования (IAEA-CN-28/H-5)	63
М. А. Ивановский, С. Н. Попов, А. П. Попрядухин и М. С. Рабинович	
Discussion	77
Plasma containment in the Proto-Cleo stellarator (IAEA-CN-28/H-6)	79
R.A.E. Bolton, J. Hugill, D.J. Lees, W. Millar and P. Reynolds	
Dependence of plasma confinement on magnetic configuration and plasma properties in the J.I. P.P. stellarator (IAEA-CN-28/H-7)	93
K. Miyamoto, A. Mohri, N. Inoue, M. Fujiwara, K. Yatsu, Y. Terashima and R. Itatani	
Discussion	107
Plasma confinement experiment in the Heliotron-D machine (IAEA-CN-28/H-8)	109
K. Uo, A. Iiyoshi, Sh. Yoshioka, T. Ishida, Sh. Konoshima and M. Sato	
Электропроводность и токовый нагрев плазмы в сильном магнитном поле (IAEA-CN-28/H-9)	119
П. Я. Бурченко, Е. Д. Волков, В. А. Рудаков, В. Л. Сизоненко и К. Н. Степанов	
Discussion	130

Экспериментальные исследования магнитных поверхностей и удержания плазмы в трехзаходном стеллараторе-торсатроне "САТУРН-1" (IAEA-CN-28/H-10)	131
В. С. Войценья, А. В. Георгиевский, В. Е. Зисер, Д. П. Погожев, А. И. Скибенко, С. И. Солодовченко, В. А. Супруненко, В. Т. Толок, И. П. Фомин и Л. А. Душин	
Поведение высокотемпературной плазмы при токовом нагреве в стеллараторе с большим широм "УРАГАН" (IAEA-CN-28/H-11)	151
А. Г. Дикий, Дж. Г. Горман, В. М. Залкинд, Г. В. Зеленин, В. Д. Коцубанов, А. П. Литвинов, В. Г. Коновалов, О. С. Павличенко, Н. Ф. Перепелкин, Н. П. Пономаренко, В. А. Супруненко, В. Т. Толок и В. М. Тонкопряд	
Discussion to papers IAEA-CN-28/H-10, H-11	161
Plasma shift in fast stellarators with finite conductivity (IAEA-CN-28/H-12)	163
D. Pfirsch and K. Schlüter	
Discussion	165

THETA PINCHES; SHOCK WAVES (Session J)

Confinement of a toroidal theta-pinch plasma in a periodic caulked-cusp field (IAEA-CN-28/J-1)	169
T. Uchida, K. Sato, A. Mohri and R. Akiyama	
Discussion	178
Toroidal high- β experiments in compact axisymmetric configurations (IAEA-CN-28/J-2)	179
H. J. Belitz, L. Janicke, P. Noll, U. Plantikow, F. Sand, J. Schlüter, F. Waelbroeck and G. Waidmann	
High-beta ($\beta = 1$)-stellarator experiments (IAEA-CN-28/J-3)	189
E. Fünfer, M. Kaufmann, W. Lotz and J. Neuhauser	
Discussion	199
Theta-pinch experiments with helical equilibrium fields in a 5-meter toroidal sector and in a 3-meter linear device (IAEA-CN-28/J-4)	201
S. C. Burnett, W. R. Ellis, C. F. Hammer, C. R. Harder, H. W. Harris, F. C. Jahoda, W. E. Quinn, A. S. Rawcliffe, F. L. Ribe, G. A. Sawyer, R. E. Siemon, K. S. Thomas and E. L. Zimmermann	
Discussion	214
Survey of Scyllac theory (IAEA-CN-28/J-5)	215
J. P. Freidberg	
Toroidal high- β equilibria (IAEA-CN-28/J-6)	223
H. Weitzner	
Plasma containment in closed line systems (IAEA-CN-28/J-7)	229
H. Grad	

Plasma heating by strong shock waves (IAEA-CN-28/J-8)	241
Y.G. Chen, C.K. Chu, R.A. Gross, E. Halmøy, P. Moriette and S. Schneider	
Experimental study of collisionless shock waves (IAEA-CN-28/J-9)	251
J.W.M. Paul, C.C. Daughney, L.S. Holmes, P.T. Rumsby, A.D. Craig, E.L. Murray, D.D.R. Summers and J. Beaulieu	
Experimental study of collective dissipation in shock waves for a wide range of plasma parameters (IAEA-CN-28/J-10)	265
M. Keilhacker, M. Kornherr, H. Niedermeyer, K.-H. Steuer and R. Chodura	
Shock waves and turbulent heating in low-density plasmas (IAEA-CN-28/J-11)	277
P. Bogen, K.J. Dietz, K.H. Dippel, E. Hintz, K. Høthker, F. Siemsen and G. Zeyer	
Ion heating in a high-voltage theta pinch (IAEA-CN-28/J-12)	289
W.D. Davis, A.W. DeSilva, W.F. Dove, H.R. Griem, N.A. Krall and P.C. Liewer	
Conditions and mechanism of theta-pinch plasma heating (IAEA-CN-28/J-13)	303
S. Kiyama and K. Ogawa	
Discussion to papers IAEA-CN-28/J-8, J-9, J-10, J-11, J-12, J-13	311

REACTOR SYSTEMS (Session K)

Experimental and computational investigations of the direct conversion of plasma energy to electricity (IAEA-CN-28/K-1)	315
R.W. Moir, W.L. Barr, R.P. Freis and R.F. Post	
Engineering and economic aspects of mirror machine reactors with direct conversion (IAEA-CN-28/K-2)	329
R.W. Werner, G.A. Carlson, J.D. Lee, R.W. Moir, R.F. Post and C.E. Taylor	
Discussion to papers IAEA-CN-28/K-1, K-2	351
Efficient re-circulation of power in mirror reactors (IAEA-CN-28/K-3)	353
J.G. Cordey, F.B. Marcus, D.R. Sweetman and C.J.H. Watson	
Discussion	372
Economic feasibility of stellarator and tokamak fusion reactors (IAEA-CN-28/K-4)	375
A. Gibson, R. Hancox and R.J. Bickerton	
Fast neutral injection for plasma heating and reactor start-up (IAEA-CN-28/K-5)	393
D.R. Sweetman, A.C. Riviere, H.C. Cole, E. Thompson, D.P. Hammond, J. Hugill and G.M. McCracken	
Discussion to papers IAEA-CN-28/K-4, K-5	409

Влияние реакций синтеза на работу термоядерных установок (IAEA-CN-28/K-7)	411
В. С. Беликов, Я. И. Колесниченко и В. Н. Ораевский	
Thermal instability and control of fusion reactor (IAEA-CN-28/K-8)	423
М. Ohta, H. Yamato and S. Mori	
Discussion	432
Engineering design studies on the superconducting magnet system of a Tokamak fusion reactor (IAEA-CN-28/K-10)	433
M.S. Lubell, W.F. Gauster, K.R. Efferson, A.P. Fraas, H.M. Long, J.N. Luton, C.E. Parker, D. Steiner and W.C.T. Stoddart	
Discussion	444
Emergency cooling and radioactive-waste-disposal requirements for fusion reactors (IAEA-CN-28/K-11)	447
D. Steiner	
Neutronic and thermal design aspects of thermonuclear fusion reactor blankets (IAEA-CN-28/K-12)	457
H. Borgwaldt, W.H. Köhler and K.E. Schroeter	
Blanket cooling concepts and heat conversion cycles for controlled thermonuclear reactors (IAEA-CN-28/K-13)	469
S. Förster and Th. Bohn	
Discussion to papers IAEA-CN-28/K-11, K-12, K-13	487

HIGH-FREQUENCY HEATING (Session L)

Neoclassical theory of magnetic pumping in toroidal geometry (IAEA-CN-28/L-1)	491
E. Canobbio	
Nouvelle méthode de pompage magnétique pour le chauffage des plasmas (IAEA-CN-28/L-2)	505
F. Koechlin et A. Samain	
Cylindrical plasma sources with densities high above critical density excited by an RF-helix with and without magnetic field (IAEA-CN-28/L-3)	513
A.E. Aubert, A.M. Messiaen and P.E. Vandenplas	
Discussion	524
Исследования трансформации и поглощения высокочастотных волн в плазме, направленные на разработку методов нагрева плазмы (IAEA-CN-28/L-4)	525
В. И. Архипенко, А. Б. Березин, В. Н. Будников, В. Е. Голант, К. М. Новик, А. А. Обухов, А. Д. Пиля, В. И. Федоров и К. Г. Шаховец	
Исследование плазмы на установке "Туман-2" (IAEA-CN-28/L-5)	543
А. И. Анисимов, Н. И. Виноградов, В. Е. Голант, В. А. Ипатов, М. Г. Каганский, С. Г. Калмыков, А. И. Кисляков, В. А. Овсянников, Л. П. Пахомов, К. А. Подушникова, С. С. Тюльпанов и К. Г. Шаховец	

Экспериментальное исследование нагрева плазмы на частоте, близкой к нижнему гибричному резонансу (IAEA-CN-28/L-6)	559
В. М. Глаголев, Н. А. Кривов и Ю. В. Скосырев	
Discussion to papers IAEA-CN-28/L-4, L-5, L-6	571
Исследование высокочастотного нагрева плазмы (IAEA-CN-28/L-7)	573
Л. И. Григорьева, А. В. Лонгинов, А. И. Пятак, В. Л. Сизоненко, Б. И. Смердов, К. Н. Степанов и В. В. Чечкин	
Эксперименты по высокочастотному нагреву плазмы в тороидальной ловушке (IAEA-CN-28/L-8)	597
С. С. Овчинников, С. С. Калининченко, П. И. Курилко, О. М. Швеи и В. Т. Толок	

SUMMARY OF THE CONFERENCE (Session M)

Review of theory	613
T. K. Fowler	
Review of experimental work	619
R. J. Bickerton	
Review of reactor systems	627
H. K. Forsen	
Chairmen of Sessions and Secretariat of the Conference	631
List of Participants	633
Author Index	661
Transliteration Index	669

CLOSED CONFINEMENT SYSTEMS
(Session H)

Chairman: G. von GIERKE

Papers H-1 and H-2 were presented by
V. I. VOLOSOV as Rapporteur

Papers H-10 and H-11 were presented by
V. S. VOITSENYA as Rapporteur

ПОВЕДЕНИЕ ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ ПРИ БОЛЬШИХ ДЛИНАХ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА ЭЛЕКТРОНОВ

В.Н.БОЧАРОВ, В.И.ВОЛОСОВ, А.В.КОМИН,
В.М.ПАНАСЮК, Ю.Н.ЮДИН
Институт ядерной физики Сибирского отделения
Академии наук СССР, Новосибирск,
Союз Советских Социалистических Республик

Abstract—Аннотация

BEHAVIOUR OF A PLASMA IN A STELLARATOR FOR THE CASE OF LARGE ELECTRON FREE-PATH LENGTHS.

A study has been carried out of the characteristics of plasma behaviour in a stellarator under conditions where the electron free-path length is larger than or of the order of the longitudinal wavelength of drift oscillations. A study has been made of the relationship between the plasma decay process (decay time, density profile, etc.) and the main parameters of the experiment (magnetic field, ratio of the currents in the helical and toroidal windings, collision frequency of the plasma radius, electron temperature, etc.). An investigation has likewise been made of the structure of the oscillations (wavelength, frequency and correlative dimensions) accompanying plasma decay; measurements have also been made of the radial plasma flows caused by these oscillations. The characteristic oscillation frequencies of the potentials, electric fields and density of the plasma are close to the drift frequency, and their dependence on the magnetic field, electron temperature and other parameters coincides with drift theory predictions. Experiments have shown that plasma decay is determined by drift oscillations, while the plasma decay time increases with an increase in the size of the magnetic field, the plasma dimensions and the parameter ϵ . At a quite small value of the magnetic field a quadratic relationship is observed between the plasma decay time and the field strength; as the field increases the relationship becomes linear, the absolute decay time being 5 to 10 times greater than the Bohm time. The results obtained may be explained quantitatively if an analysis is made of the radial plasma flows caused by azimuthal drift electric fields. This process gives the characteristic time for plasma losses $\tau_p \approx \gamma^{-1}(a/x_0)$. Here γ is the increment in the drift-collisionless oscillations, a the plasma dimensions and x_0 the amplitude of the radial oscillations of the plasma. The expression for τ_p coincides with the empirical formulae for that value obtained experimentally.

ПОВЕДЕНИЕ ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ ПРИ БОЛЬШИХ ДЛИНАХ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА ЭЛЕКТРОНОВ.

Проводилось изучение особенностей поведения плазмы в стеллараторе в режимах, когда свободный пробег электронов больше или порядка продольной длины дрейфовых колебаний. Изучалась зависимость процесса распада плазмы (время распада, профиль плотности и т.д.) от основных параметров эксперимента (магнитного поля, отношения токов в винтовой и торондальной обмотках, частоты столкновений радиуса плазмы, температуры электронов и др.). Одновременно исследовалась структура колебаний (длины волны, частоты, корреляционные размеры), сопровождающих распад плазмы, а также проводились измерения радиальных потоков плазмы, вызванных этими колебаниями. Характерные частоты колебаний потенциалов, электрических полей и плотности плазмы лежат близко к дрейфовым, а их зависимость от магнитного поля, температуры электронов и других параметров совпадает с предсказаниями дрейфовой теории. Эксперименты показали, что распад плазмы определяется дрейфовыми колебаниями, время распада плазмы возрастает с увеличением магнитного поля, размеров плазмы и параметра ϵ . При достаточно малом значении магнитного поля наблюдается квадратичная зависимость времени распада плазмы от величины поля; по мере увеличения поля она переходит в линейную, при этом абсолютное время распада в 5-10 раз больше бомовского времени. Полученные результаты можно качественно объяснить, если провести анализ радиальных потоков плазмы, вызванных азимутальными дрейфовыми электрическими полями. Этот процесс дает характерное время потерь плазмы $\tau_p \approx \gamma^{-1}(a/x_0)$. Здесь γ — инкремент дрейфово-бесстолкновительных колебаний, a — размер плазмы, x_0 — амплитуда радиальных колебаний плазмы. Выражение для τ_p совпадает с эмпирическими формулами для τ_p , полученными экспериментально.

Продолжалось изучение плазмы на стеллараторе Института ядерной физики Сибирского отделения Академии наук СССР. Подробное описание экспериментальной установки было приведено в работах [1-3]. Основные параметры стелларатора: большой радиус тора — 50 см, малый радиус — 5 см, магнитное поле H — до 3-3,5 кэ, трехзаходная винтовая обмотка, ϵ^2 — до 0,2. Плазма создавалась методом стохастического нагрева [4-5], как и в опубликованных ранее экспериментах.

В отличие от прежних экспериментов, проводилось более тщательное измерение температуры электронов в процессе всего распада, что позволило уточнить зависимость времени распада от различных параметров. С помощью корреляционных методов изучались пространственные характеристики колебаний и измерены радиальные потоки плазмы, обусловленные колебаниями.

МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПАДА ПЛАЗМЫ

Изучалась зависимость скорости распада плазмы от основных параметров эксперимента: магнитного поля H , отношения токов в винтовой и тороидальной обмотках стелларатора (параметр ϵ), температуры электронов T_e , давления нейтрального газа p .

Основные эксперименты были выполнены на аргоне; для сравнения некоторые зависимости были измерены также на He и Xe. Чистота использованных газов была достаточно высокой, концентрация примесей молекулярных газов не превышала 10^{-2} – $10^{-3}\%$. Давление нейтрального газа в экспериментах менялось от $5 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ тор, при давлении остаточного газа $2\text{--}3 \cdot 10^{-7}$ тор. Перед измерениями поверхность камеры подвергалась тренировке разрядом в рабочем газе.

Плотность плазмы определялась с помощью открытого СВЧ-резонатора ($f = 1830$ МГц); температура электронов, потенциалы и локальная плотность плазмы измерялись лэнгмювскими зондами, установленными, как и резонатор, на прямолинейных промежутках камеры. Максимальная плотность плазмы в разряде достигала $1,5 \cdot 10^{10}$ см $^{-3}$, в процессе распада измерения велись до плотности $\sim 2 \cdot 10^6$ см $^{-3}$. Для измерения температуры электронов использовался один из вариантов зондового метода [6], который позволял быстро, без дополнительной обработки, определять T_e в любой точке вдоль распада. Размеры зонда: диаметр — 0,035 мм, длина — 5–7 мм; при этом практически всегда ларморовский радиус электронов был больше радиуса зонда (см. [7]). Остывание плазмы в процессе распада определялось, в основном, потерями энергии электронов из "хвоста" максвелловского распределения на возбуждение нейтральных атомов. На рис. 1 приведены типичные зависимости температуры электронов и плотности плазмы от времени.

Радиальные профили температуры T_e и плотности плазмы n (см. рис. 2) несколько меняют свою форму в начальной стадии распада. Длительность этого переходного процесса на Ar была обычно $< 0,5$ мсек; измерение времени распада плазмы проводилось лишь после установления профиля плотности.

При увеличении давления нейтрального газа и величины магнитного поля наблюдалось некоторое уплощение вершины радиального профиля плотности n , соответственно, уменьшение градиентного размера. Сле-