

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

62-63

WARSZAWA—POZNAN 1973

P A Ń S T W O W E W Y D A W N I C T W O N A U K O W E

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

KOMITET REDAKCYJNY - EXECUTIVE EDITORS
KAZIMIERZ STELLER - REDAKTOR - EDITOR
JERZY KOŁODKO · JÓZEF ŚMIGIELSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA - EDITORIAL OFFICE
Instytut Maszyn Przepływowych PAN, 80-952 Gdańsk,
skr. pocztowa 621, Gdańsk-Wrzeszcz, ul. Gen. Józefa Fiszer 14, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1973

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 410+90 egz.	Oddano do składania 19 XII 1972 r.
Ark. wyd. 19,5. Ark. druk. 15,375+2 wkl.	Podpisano do druku 29 IX 1973 r.
Pap. druk. sat. kl. V, 70 g	Druk ukończono w październiku 1973 r.
Nr zam. 814/155	D-15/787 Cena zł 58,-

DRUKARNIA UNIwersytetu im. A. Mickiewicza w Poznaniu

Czwarte Seminarium poświęcone zagadnieniom
MAGNETOHYDRODYNAMIKI STOSOWANEJ
I GAZODYNAMIKI WYSOKICH TEMPERATUR

Jena, maj 1972

Čtvrtý Seminář o
APLIKOVANÉ MAGNETOHYDRODYNAMICE
A DYNAMICE PLYNU ZA VYSOKÝCH TEPLŮT

Jena, květen 1972

Viertes Arbeitsseminar über Fragen
DER ANGEWANDTEN MAGNETOHYDRODYNAMIK
UND HOCHTEMPERATUR-GASDYNAMIK

Jena, Mai 1972

Fourth Seminar on
APPLIED MAGNETOHYDRODYNAMICS
AND HIGH TEMPERATURE GASDYNAMICS

Jena, May 1972

Четвертый Семинар по
ПРИКЛАДНОЙ МАГНИТОГИДРОДИНАМИКЕ
И ГАЗОДИНАМИКЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Ена, май 1972 г.

LUDWIG ROTHHARDT

Jena*

Edelgasbetriebene MHD-Generatoren — Ein Situationsbericht

Im Rahmen unseres ersten Arbeitsseminares über Fragen der Angewandten Magneto-hydrodynamik im Jahre 1966 beschäftigten wir uns erstmalig gemeinsam mit der Problematik der MHD-Generatoren [1].

In diesem Beitrag zum vierten Arbeitsseminar soll nun über die Situation speziell im Sektor der edelgasbetriebenen MHD-Generatoren, die für eine Verkopplung mit einer nuklearen Wärmequelle vorgesehen sind, berichtet werden. Hierzu wird besonders auf die Materialien der in der Zwischenzeit stattgefundenen internationalen MHD-Konferenzen 1968 in Warschau [K3] und 1971 in München [K4] zurückgegriffen werden, die die internationale Situation gut zu überschauen gestatten.

1. Internationale Ausgangssituation

Die internationale Energielage führte in der Mitte unseres Jahrhunderts zur kritischen Überprüfung der noch vorhandenen und ausbeutbaren Ressourcen an Energieträgern und zu kritischen Betrachtungen über das Wachstum der Erdbevölkerung und deren Energiebedarf. Eine deutlich ableitbare Konsequenz war, daß der Wirkungsgrad bei der Nutzung der noch vorhandenen Energieträger soweit wie möglich erhöht werden müsse. Hierfür bietet sich der MHD-Generator wegen der Größe seiner Einheiten und der Einfachheit seiner Wirkprinzipien direkt an. Eine erste Publikation von Sporn und Kantrowitz [2] löste daher eine ganze Lawine von Untersuchungen aus und erweckte größte Hoffnungen bei den Energiewirtschaftlern.

Inzwischen hat sich ganz deutlich herausgestellt, daß der Fortschritt in der Energiewirtschaft im internationalen Rahmen doch langsamer erfolgt als Anfang der sechziger Jahre prognostiziert wurde. Dies gilt auch für den als Wärmequelle für edelgasbetriebene MHD-Generatoren vorgesehenen gasgekühlten Höchsttemperatur-Kernspaltungsreaktor. Trotzdem haben aber die aus der hier gegebenen Problemstellung abzuleitenden Anforderungen an einen edelgasbetriebenen MHD-Generator:

- Impfung mit leicht ionisierbarem Alkalimetalldampf,

* Zentralinstitut für Elektronenphysik der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Institutteil VI — Magnetoplasmadynamik, Jena.

- Erreichung einer überthermischen elektrischen Leitfähigkeit
 - Beherrschung eines starken Hall-Effektes,
- zu außerordentlich interessanten Untersuchungen Anlaß gegeben, über die im folgenden berichtet werden wird.

2. Instabilitäten im Kanal, ihre theoretische Behandlung und numerische Modellierung

Im Gegensatz zu den flammgasbetriebenen MHD-Generatoren, in denen nicht mit einer wesentlichen Erhöhung der Elektronentemperatur über die Gastemperatur gerechnet werden kann und auch ein Hall-Effekt nur relativ schwach ausgeprägt sein kann, muß in edelgasbetriebenen Nichtgleichgewichts-MHD-Generatoren von vornherein mit dem Auftreten von Instabilitäten gerechnet werden. Diese können entweder den Charakter einer Ionisationsinstabilität haben, also zu örtlicher und zeitlicher Variation des Ionisationsgrades und damit der Elektronendichte führen, oder aber von nichtlinear werdenden magnetoakustischen Wellen großer Amplitude herrühren. In beiden Fällen ergibt sich bei voller Entwicklung der Instabilität eine starke Fluktuation wesentlicher Plasmamaparameter, wie sie in vielen, zuverlässigen Experimenten beobachtet wurde.

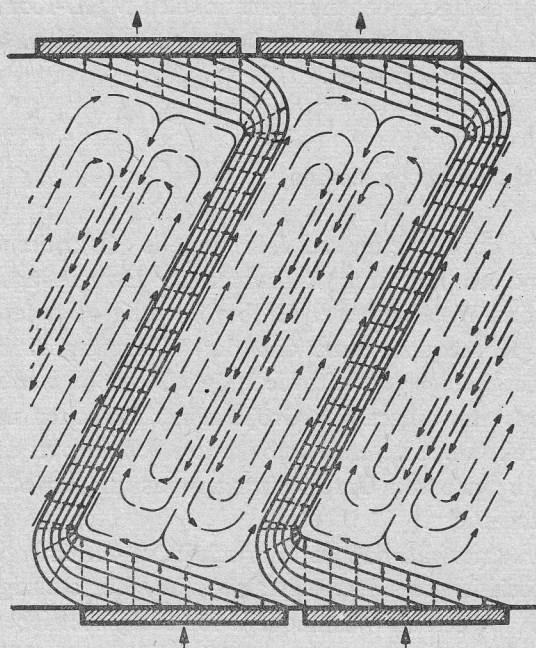


Abb. 1. Stromverteilung in einem neutralen, stoßbestimmten Plasma unter der Wirkung eines transversalen Magnetfeldes bei periodischen Randbedingungen nach Lengyel [3]

Die theoretische Behandlung kann in verschiedener Weise erfolgen, wobei jeweils nur eine vereinfachte Annäherung an die reale Situation betrachtet werden kann. Lengyel [3] untersucht z.B. mit Hilfe der Charakteristikenmethode zwei-dimensionale Stromdichte- und Potentialverteilungen in Nichtgleichgewichtsplasmen. Oberhalb eines kritischen Wertes der Stärke des magnetischen Feldes ist die von ihm untersuchte Entladung im transversalen Magnetfeld geschichtet, auch wenn das Plasma frei von äußeren Störungen angesetzt ist.

Seine zwei-dimensionalen Lösungen zeigen auch, daß in sich geschlossene Stromschleifen in der Entladung existieren, sobald das Feld eine kritische Stärke überschreitet. Abbildung 1 zeigt beispielhaft ein Resultat seiner Rechnungen für überkritisches Feld bei periodischen Randbedingungen, d. h. für den Fall segmentierter Elektroden.

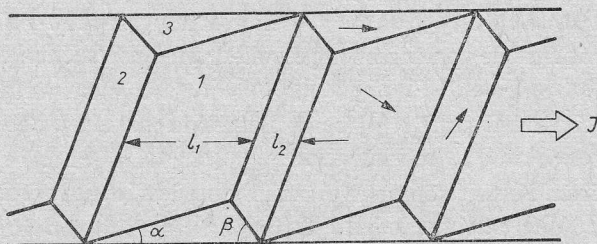


Abb. 2. Stromführende Zonen nach Dychne [4]

Dychne [4] wählt einen anderen Zugang zur Behandlung der Ionisationsinstabilität, indem er homogene Zonen (etwa wie die Weißchen Bezirke in Ferromagnetika) voraussetzt und die Bedingungen für diese Zonen postuliert konstanter Stromrichtung und -dichte als Lösungen einer dreideutigen Energiebilanz entnimmt, die als Verlustmechanismus die Elektronenwärmeleitung enthält. Abbildung 2 zeigt eine stabile Lösung, die unter diesen Voraussetzungen gewonnen wurde, wobei der elektrische Strom im Mittel von links nach rechts fließt, während in den mit 1 und 2 gekennzeichneten Bereichen Abweichungen von dieser Richtung auftreten.

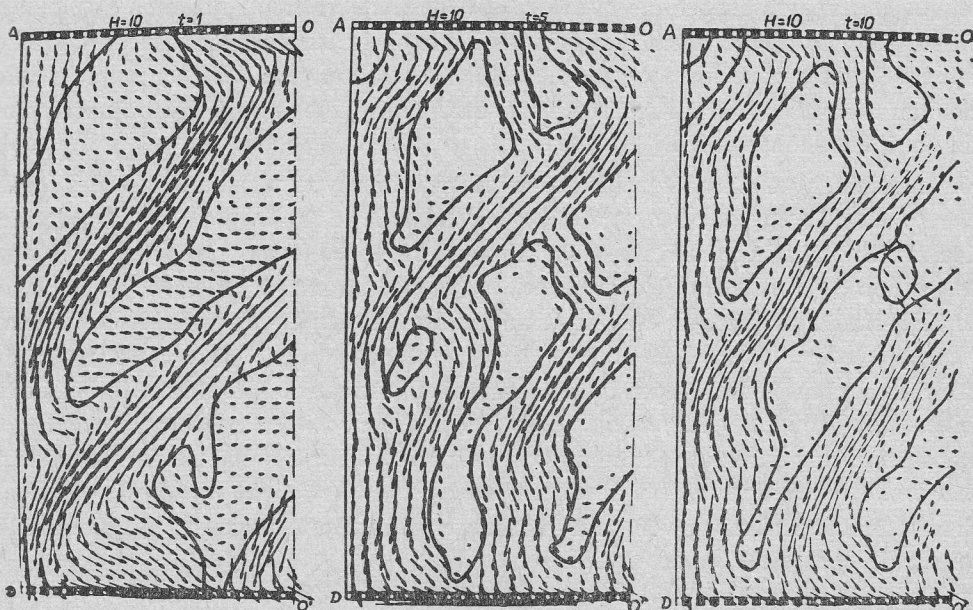


Abb. 3. Entwicklung von Streamern, numerisch modelliert von Welichow u. Mitarb. [5]. Zeitliche Folge: a—b—c

Welichow u. Mitarb. [5] schließlich modellieren in einem numerischen Modell die nichtlineare Entwicklung einer Ionisationsinstabilität im transversalen Magnetfeld. Es zeigt sich auch hier, daß eine Schichtung auftritt, wie sie in Abbildung 3a-c in drei verschiedenen Stadien der Entwicklung dargestellt ist.

An der Existenz dieser Schichtungen oder „Streamer“ kann nicht mehr gezweifelt werden, auch wenn in allen drei genannten Untersuchungen ein $\mathbf{v}$ -Feld noch fehlt. Dies bedeutet nur, daß eine Brücke von den eben geschilderten Untersuchungen zu theoretischen Betrachtungen an „turbulenten“ Plasmen noch nicht geschlagen wurde, obwohl in der schon zitierten Arbeit von Dychne [4] beide Betrachtungsweisen nebeneinander stehen. Erst wenn die Wechselwirkung zwischen hydrodynamischen Kräften und elektrodynamischen Kräften in der gestörten Kanalströmung vollständig berücksichtigt wird, kann man Aussagen erwarten, die von dem in eine laminare Strömung eingebetteten Streamerbild über die Rückwirkung dieser Streamer auf das Strömungsfeld zu den ersten Stadien der Turbulenzentwicklung führen. Wie schwierig dies ist, braucht hier sicher nicht ausführlich dargestellt zu werden.

3. Experimente mit Edelgas/Alkali-MHD-Kanalströmungen

Experimente mit Edelgas/Alkali-MHD-Kanalströmungen wurden nach Sicherstellung der Richtigkeit der Grundvorstellungen durch Messung der $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ -EMK vorwiegend zum Studium der Instabilitäten im Kanal angestellt. Insbesondere die Arbeiten von Brederlow und Mitarb. [6] sowie von Nedospassow und Mitarb. [7] waren in dieser Hinsicht erfolgreich. Beiden Gruppen gelang die direkte Erfassung und Vermessung der Streamerererscheinungen. Freilich blieben die in den relativ kleinen Kanälen induzierten Spannungen noch so niedrig, daß die zugehörigen Stromdichten nicht ausreichten, schnellfotografisch erfassbare Strukturen zu erzeugen; die Leuchtdichte blieb zu gering. Daher mußte in allen Fällen der durch den MHD-Kanal fließende Strom mit Hilfe zugeschalteter äußerer Spannungsquellen erhöht werden.

Je nachdem, ob die Zusatzquelle additiv oder subtraktiv zur inneren EMK des MHD-Generator-Kanals zugeschaltet wurde, beobachteten Nedospassow u. Mitarb. unterschiedliche Bilder. Im ersten Falle — dem Bremsregime, weil $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ vergrößert wird — wurden oberhalb des kritischen Feldwertes hell leuchtende Strombrücken beobachtet und mit einer SFR-Kamera erfaßt, die etwa in Richtung des Stromes lagen und mit wachsendem $\omega \tau$ enger wurden. Im zweiten Falle — dem beschleunigenden Regime, weil $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ das Vorzeichen gewechselt hat — zerfällt das leuchtende Plasma an der Eingangsseite des Kanals in feine, fadenförmige Strukturen, die nahezu senkrecht zur mittleren Stromrichtung liegen. Eine Beeinflussung durch das Strömungsfeld ist in diesen Experimenten also offensichtlich vorhanden. Die Weiterentwicklung schnellfotografischer Verfahren wird hoffentlich bald auch die direkte Erfassung von $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ -induzierten Stromverteilungen in MHD-Kanälen bei überkritischen Feldwerten ermöglichen.

Brederlow u. Mitarb. untersuchten neben der Leuchtstruktur der Entladung im Kanal auch noch mit Hilfe einer kleinen beweglichen Doppelsonde die lokalen Feldfluktuationen und ihre Richtungsabhängigkeit. Der Charakter dieser Fluktuationen bestätigt noch einmal

unabhängig, daß die beobachtete Instabilität tatsächlich als Ionisationsinstabilität bezeichnet werden muß.

Edelgas/Alkali-MHD-Kanalströmungen werden noch einige Zeit Objekte physikalischer Forschung bleiben, wenn auch grobe Vorstellungen über erreichbare Parameter und die Größe der zu erwartenden Fluktuationen bereits vorliegen.

4. Unterdrückung der Instabilitäten

Neben den vielen Versuchen, ein vertieftes Verständnis der in Edelgas/Alkali-MHD-Kanalströmungen auftretenden Instabilitäten zu erreichen, gibt es in letzter Zeit auch interessante Überlegungen darüber, wie man die Instabilitäten unterdrücken kann. Zwei Möglichkeiten wurden vor allem diskutiert:

- Edelgas mit vollionisiertem Alkali als Arbeitsmedium,
- Beigabe molekularer Komponenten (N_2 , CO) zum Edelgas/Alkali-Gemisch.

4.1. Volle Ionisation des Impfstoffes (z. B. Cs) kann erreicht werden, wenn man die Impfstoffkonzentration reduziert. Da eine Ionisationsinstabilität naturgemäß dann nicht mehr auftreten kann, erreichen solche Gemische ihre ideale (ungestörte) elektrische Leitfähigkeit. Einer Arbeit von Nakamura und Riedmüller [10] ist eine Darstellung (Abb. 4) zu entnehmen, die die elektrische Leitfähigkeit eines Argon/Cäsium-Gemisches

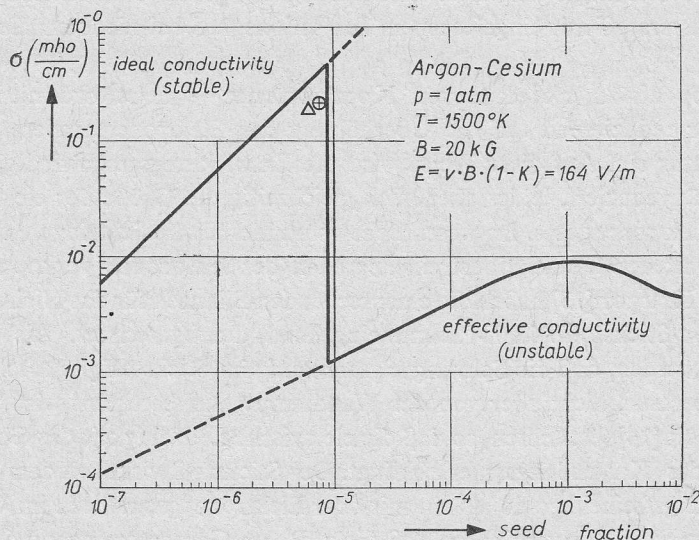


Abb. 4. Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit eines Ar/Cs-Gemisches vom Impfstoffanteil nach Nakamura und Riedmüller [10]

unter typischen experimentellen Bedingungen ($p=1 \text{ at}$, $T=1500^\circ\text{K}$, $B=20 \text{ kG}$) bei Variation der Cs-Konzentration wiedergibt. Es zeigt sich deutlich, daß das klassische Optimum der effektiven Leitfähigkeit bei einem Impfstoffanteil von 10^{-3} niedriger liegt als die nicht durch Instabilitäten gestörte Leitfähigkeit mit Impfstoffanteilen unter 10^{-5} . Freilich stellt

die Realisierung derartig geringer Anteile an Impfstoff und natürlich auch an ungewünschten, leicht ionisierbaren Fremdbeimengungen größte Anforderungen an später zu entwickelnde Edelgas /Alkali-Kraftwerkszyklen.

Der große Vorteil des extremen Verhältnisses zwischen Edelgas- und Alkalianteil im Gemisch liegt aber darin, daß auch in kalten Gasströmungen eine hohe Hall-Spannung prinzipiell aufgebaut werden kann. Setzt man z.B. im Sinne einer groben Abschätzung einmal voraus, daß Ionen und Neutralatome im starken Impulsaustausch stehen, während die Elektronen durch ein Magnetfeld am Ort fixiert werden, dann bildet sich in der Strömung auf Grund der thermischen Energie der schweren Teilchen eine Ladungstrennung aus, die nichts anderes als das Hall-Feld erzeugt. Bei einer Argon- und Cs^+ -Temperatur von 1500°K und einem Impfstoffanteil von 10^{-3} Mol % kann so eine Hall-Spannung von etwa 10^4 V erwartet werden. Bei einer Kanallänge von 5 m entspräche dies einer prinzipiell möglichen Hall-Feldstärke von etwa 20 V/cm (!). Das Arbeiten mit hohen Werten des Hall-Parameters wird im vorliegenden Falle jedenfalls nicht aus inneren Gründen unmöglich gemacht.

Bei einigen Scheiben-Generator-Untersuchungen mit hohem Impfstoffanteil und niedrigem Druck, z.B. denen von Witschas u.a. [8] scheint dies aber schon der Fall zu sein. Auch die Untersuchungen von Karejew u.a. [9] in Hg/Cs-Gemischen dürften dadurch beeinträchtigt worden sein, daß auf Grund der Impulsbilanz der schweren Teilchen die formal über $\omega \tau$ und $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ errechnete Hall-Spannung nicht physikalisch realisiert werden konnte. Sehr deutlich zeigte sich diese Erscheinung in eigenen Untersuchungen in reinem Argon bzw. Wasserstoff mit eingefrorenem Ionisationsgrad bei niederem Druck [11, 12].

4.2. Beigabe einer molekularen Komponente — meist wird mit N_2 gearbeitet — wirkt primär reduzierend auf die Überhöhung der Elektronentemperatur gegenüber der Gasttemperatur ein. Auf diese Weise wird die Entwicklungsgeschwindigkeit der Ionisationsinstabilität reduziert, leider aber auch gleichzeitig die Größe der elektrischen Leitfähigkeit des Elektronengases. Im wesentlichen sind hierbei die Schwingungsfreiheitsgrade der Moleküle mit den Translationsfreiheitsgraden der Elektronen verkoppelt. Bender, Mitchner and Kruger [13] haben die entsprechenden Bilanzen für das Nichtgleichgewicht in einem Argon/Stickstoff/Alkali-Plasma eingehend durchgerechnet. Als günstig muß hervorgehoben werden, daß die Schwingungsanregung im Stickstoff praktisch nur von der Elektronentemperatur, nicht aber von der Wandtemperatur bestimmt wird, wie Draper und Kerrebrock [14] feststellten, so daß die elektrische Leitfähigkeit des Gemisches beim Durchströmen des Kanals langsamer abklingt. Der Stickstoff wirkt mit dem Energieinhalt seiner Schwingungsfreiheitsgrade als ein mit dem Elektronengas nahezu im Gleichgewicht befindliches Reservoir, das verhindert, daß die z. B. am Generatoreingang durch eine von außen betriebene Entladungsstrecke erzielte hohe Elektronentemperatur zu schnell abklingt. Untersuchungen von Massee [15] lassen allerdings vermuten, daß derartige relaxierende Argon/Stickstoff/Alkali-Plasmen unter Bedingungen, die für MHD-Generatoren von Interesse sind, noch immer ungenügend große Relaxationslängen besitzen. Massee betont, daß die unter stabilen Bedingungen mit völlig ionisiertem Impfstoff erreichbaren Leistungsdichten wesentlich höher liegen als beim Arbeiten mit N_2 -Beigabe, so daß derartige Beigaben nicht die erhoffte Lösung des Problems bringen.

5. Abschließende Bemerkungen

Es ist offensichtlich, daß im hier besprochenen Arbeitsgebiet noch einige Zeit physikalische Grundlagenforschung betrieben werden muß, wenn die auftretenden Phänomene voll verstanden werden sollen. Dies sollte nach Möglichkeit in größeren Pilotanlagen geschehen, um tatsächlich mit der inneren $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ -EMK allein arbeiten zu können. Pilotanlagen werden aber sicherlich nur aufgebaut werden können, wenn die spätere ökonomische Attraktivität sichergestellt ist, was bis heute noch nicht einmal für die nukleare Wärmequelle und die mit ihr erreichbaren Eintrittsparameter am MHD-Kanal gesagt werden kann. Bereits vorliegende ökonomische Studien lassen keine bindenden Aussagen für den edelgasbetriebenen MHD-Generator zu. Offensichtlich ist die Einschätzung auch sehr von der ökonomischen Situation einer jeden Volkswirtschaft abhängig. Bertolini und Hoffman [16] bemühten sich dennoch um eine Bearbeitung dieser schwierigen Problematik. Sie konnten zeigen, daß eine Optimierung des gesamten Zyklus dann möglich ist, wenn man auf die Optimierung der einzelnen Elemente verzichtet. Bei Reaktoraustrittstemperaturen von 2000°K und Leistungsdichten von 4,6 MW/m³ im Kernreaktor und 6000 MW in der Strömung können in einer Kombination von gasgeköhltem Höchsttemperaturreaktor, MHD-Generator und modernem Dampfzyklus bei MACH-Zahlen von 0,9 ... 2,0 im Kanal und Reaktorgasdrücken von 10...30 at Wirkungsgrade bis zu 50 % erhofft werden. Über Anlagekosten wird allerdings nichts ausgesagt.

Literatur

Wichtige Konferenzberichte

- [K1] Magnetoplasmadynamic Electrical Power Generation, I.E.E., London 1963.
- [K2] Magnetohydrodynamic Electrical Power Generation, Vol. I - IV, E.N.E.A., Paris 1965.
- [K3] Electricity from MHD, Vol. I - V. I. A.E.A., Wien 1968.
- [K4] MHD — Fifth International Conference on Magnetohydrodynamic Electrical Power Generation, Vol. I - IV, Karlsruhe 1971.

Einzelbeiträge

- [1] L. Rothhardt, Prace IMP, Nr. 34 1967, 9.
- [2] PH. Sporn, A. Kantrowitz, Power (Nov. 1959).
- [3] L. L. Lengyel, siehe [K 4] Vol. II, p. 207.
- [4] A. M. Dychne, siehe [K 4] Vol. II, p. 247.
- [5] E. P. Welichow, L. M. Degtjarew, A. P. Faworski, siehe [K 4] Vol. II, p. 307.
- [6] G. Brederlow, H. Zinko, K. -J. Witte, siehe [K 4] Vol. II, p. 387.
- [7] M. M. Malikow, W. S. Golubew, A. W. Nedospassow, siehe [K 4] Vol. II, p. 371.
- [8] A. F. Witschas, W. S. Golubew, M. M. Malikow, siehe [K 3] Vol. I, p. 529.
- [9] J. A. Karejew, W. T. Karpuchin, A. W. Nedospassow, siehe [K 3] Vol. I, p. 547.
- [10] T. Nakamura, W. Riedmüller, siehe [K 4] Vol. II, p. 291.
- [11] L. Rothhardt, G. Jahn, Prace IMP, Nr. 54 - 55, 1971, 31.
- [12] L. Rothhardt, Beitr. Plasmaphysik 12 (1972) 27.
- [13] D. J. Bender, M. Mitchner, C. H. Kruger, siehe [K 4] Vol. II, p. 107.
- [14] J. S. Draper, J. L. Kerrebrock, siehe [K 4] Vol. II, p. 471.
- [15] P. Massee, siehe [K 4] Vol. II, p. 275.
- [16] E. Bertolini, M. A. Hoffman, siehe [K 4] Vol. II, p. 497.

Generatory MHD zasilane gazem szlachetnym — opis sytuacyjny

Streszczenie

Przedstawiono próby krytycznej oceny światowego stanu badań nad generatorami MHD, zasilanymi gazem szlachetnym. Uwzględniono przy tym szczególnie teoretyczne i doświadczalne badania niestabilności występujących w tych urządzeniach. Ponadto rozważono następujące możliwości zmniejszenia lub uniknięcia niepożądanych skutków niestabilności:

- 1) całkowitą jonizację posiewu,
- 2) dodawanie składnika cząsteczkowego (N_2 lub CO).

MHD Generators Fed with Noble Gases—Status Report

Summary

The world status of research on MHD generators fed with noble gases is critically surveyed. Both the theoretical and experimental investigations of instabilities occurring in generators of this type have been taken into consideration. Moreover, the following possibilities of reducing or avoiding disadvantageous effects of instabilities are considered:

- 1) complete ionization of seed,
- 2) adding of a molecular component (N_2 or CO).

МГД генераторы питаемые инертным газом

Резюме

Представлена попытка критической оценки мирового состояния исследований МГД генераторов, питаемых инертным газом. При этом особенно учитываются теоретические и экспериментальные исследования неустойчивостей, имеющих место в этих устройствах.

Кроме того обсуждаются следующие возможности уменьшения или избежания нежелательных последствий этих неустойчивостей:

- 1) полная ионизация посева,
- 2) прибавление молекулярной составляющей (N_2 или CO).