

# MHD GENERÁTORKUTATÁS HELYZETE ÉS AZ AHHOZ KAPCSOLÓDÓ HAZAI PLAZMADIAGNOSZTIKAI VIZSGÁLATOK HELYZETKÉP

ANTAL KÁLMÁN\*—BOLLA ISTVÁN\*\*—TANOS ERVIN\*\*\*—PILINYI ANDRÁS\*\*\*\*

(Beérkezett 1976. január 15-én]

Az alábbi helyzetelemzés a közvetlen villamosenergia átalakítás egyik perspektivikus ágazatával, a fosszilis tüzelőanyagot használó mágneses hidrodinamikai (MHD) úton történő nyitott ciklusú, munkagázzal működő, közhasznú, nagy teljesítményű (1000 MW és nagyobb) villamosenergia termeléssel foglalkozik. Nem tárgyalja a zárt-ciklusú munkagáz üzemű általában atomreaktorral összehangolható és a folyadék munkaközegű MHD generátorok kutatási munkáit. Áttekinti a legjelentősebb szovjet és amerikai kísérleti MHD-berendezéseken elért legfontosabb eredményeket, az alkalmazott diagnosztikai módszereket, a nemzetközi együttműködés helyzetét, s ezen belül a magyar—szovjet MHD-együttműködést.

## I. Bevezetés

A mágneses hidrodinamikai úton történő energia átalakítással kapcsolatos kutatási és fejlesztési munkák az elmúlt években jelentősen felgyorsultak, mondhatni minőségi változáson mentek keresztül. Amíg a 60-as években az alapvető problémát az elméleti kérdések tisztázása és a kutatási főirányok meghatározása jelentette, addig ma már a főhangsúly a komplex, 1000 MW nagyságrendű művek részegységeinek kifejlesztésén és a rendszertechnikai kérdések megoldásán van.

A kutatási-fejlesztési munkákban a fordulópontot az 1971-es müncheni MHD-konferencia jelentette, ahol az MHD kutatásban élenjáró ország — a Szovjetunió — U-25-ös egységén elért eredményei világossá tették, hogy az MHD generátorokkal történő közvetlen energia átalakítás a megvalósítás stádiumába lépett. Az U-25 egységen ugyanis először nyílt lehetőség arra, hogy a korábban elért részeredmények szintézise alapján egy komoly anyagi ráfordítást igénylő, kis teljesítményű MHD-erőműben tanulmányozzák, s fogalmazzák meg az ipari méretű berendezések létrehozásához még feltétlenül megoldandó feladatokat. Ez egyben megnyitotta az utat a széles körű nemzetközi együttműködés előtt is, mivel ma már deduktív úton konkrétan megfogalmazhatók az egyes országok műszaki felkészültségének megfelelő, megoldásra

\* Antal Kálmán 1204 Bp. Ritka u. 3.

\*\* Bolla István 1036 Bp. Korvin O. u. 47.

\*\*\* Tanos Ervin 1163 Bp. Bányai u. 3.

\*\*\*\* Pilinyi András 1133 Bp. Pozsonyi út 50.

váró feladatok. Ily módon minimálisra lehet csökkenteni a korábbi szerteágazó kutatásokkal járó kockázatvállalást, amely a 60-as évek végén több fejlett ipari országot is, mint Anglia, Franciaország vagy a Német Szövetségi Köztársaság, arra készítetett, hogy leállítsa vagy erősen mérsékelte MHD kutatásait. Az MHD kutatás általános helyzetét ma már a kutatási irányok szerinti bontásban nehéz lenne átfogóan értékelni. Célszerűnek láttuk a téma áttekintésekor a szovjet és amerikai nagy MHD berendezéseknél felmerült kérdések köré csoportosítani az MHD kutatással kapcsolatos jelenlegi műszaki feladatokat.

Az alábbiakban értékeljük a Szovjetunióban üzemelő U-02 és U-25-ös, valamint az Egyesült Államokban felépített Mark VI és Mark VII kísérleti egységeken kapott legújabb eredményeket, elemezzük az ipari méretű MHD erőművek felépítésére és alapvető üzemi paramétereire vonatkozó legújabb elképzeléseket s kiterünk a már meglévő, s a jelenleg kialakuló nemzetközi együttműködések keretében folyó kutatási és fejlesztési munkákra.

Végezetül körvonalazzuk a Magyarországon folyó MHD kutatásokat, amelyek ma már szerves részét képezik az MHD erőművek létrehozására irányuló nemzetközi erőfeszítéseknek.

A tanulmány összeállításakor a szerzők az „Irodalomjegyzék”-ben megadott forrásmunkákon túlmenően a szovjet MHD berendezések látogatásakor szerzett tapasztalataikat, valamint a vezető szovjet szakemberekkel folytatott személyes diskusziók során kapott információkat használták fel.

## **2. Kísérleti eredmények a magnetohidrodinamikussal üzemeltetett villamosenergia előállítás területén**

A Szovjetunióban, az Egyesült Államokban és több fejlett ipari országban számos intézmény foglalkozik az MHD villamosenergia előállítással kapcsolatos műszaki problémák megoldásával. Az így születő eredmények azonban a hasznosíthatóság szempontjából csak olyan nagyméretű, komplex kísérleti berendezésekben ítélték meg, amelyek már folyamatos villamosenergia termelésre alkalmasak és modellezik az 1000 MW nagyságrendű ipari méretű erőművek műszaki problémáit.

Ebből a szempontból jelenleg csak a Szovjetunió U-02-es, U-25-ös és az Egyesült Államok Mark VI és Mark VII kísérleti egységei (és az ott létrejött kísérleti eredmények) tarthatnak számot fokozottabb érdeklődésre.

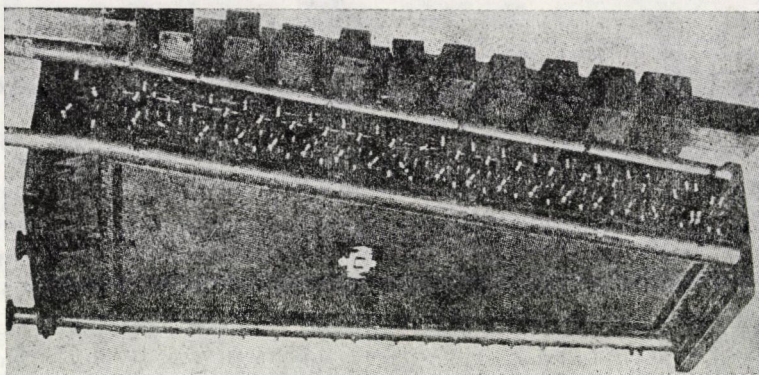
Az alábbiakban összegezzük a fenti kísérleti berendezéseken az elmúlt években született, műszaki tudományos eredményeket tükröző, fontosabb konstrukciós jellemzőket, s röviden kitérünk az MHD csatornában uralkodó viszonyok tanulmányozására szolgáló diagnosztikai egységekre és módszerekre.

*Az U-02 egység*

Az elsőnek elkészült U-02 kísérleti MHD erőmű már minden lényeges elemet tartalmaz, ami egy tényleges MHD erőmű működéséhez szükséges. A kísérleti egység speciális készülékek, valamint a termofizikai és elektrodfizikai alapfolyamatok vizsgálatára készült. Legfontosabb alkotó elemei az 1800–2300 K hőmérsékleten működő levegő előmelegítő, az égőkamra, az MHD csatorna, egy hagyományos felépítésű 1,8 T térerősségű mágnes, inverter, gőzfejlesztő, sózóanyag visszanyerő és néhány kiegészítő berendezés. A modellegységen már több mint 20 különböző generátor csatornát vizsgáltak. Ezek között volt kerámia és vízhűtésű szegmentált fém szigetelőfalú, és kipróbáltak különböző elektródákat is. A generátor által leadott maximális teljesítmény 75 kW volt. A csatorna elektródái közötti üresjárási feszültség 250 V, míg a zárlati áram 30–50 A elektródánként. A leghosszabb futási idő meghaladta a 300 órát. A csatornán belül vizsgálták az elektromágneses tér struktúráját, az elektródák elektromos és leépülési jelenségeit stb. Különleges konstrukciót készítettek a levegő előmelegítőhöz és az égőkamrához. A sózóanyag visszanyerésére szolgáló rendszer hatásfoka több mint 90%. Azonkívül elsőként itt készült el egy automatikus üzemviteli ellenőrző és jelző rendszer. Vizsgáljuk most meg az U-02 berendezés néhány alkotóelemét részletesebben is. Az égőkamra fala  $ZrO_2$  kerámia és felépítése megfelel a hagyományos égőkamra konstrukcióknak. A kamrában metán - levegő keveréket égetnek, kismértékű oxigén dúsítással. A levegőt 1800–2000 K-ra melegítik elő, a tüzelőanyag (gáz) nyomása 1,6–2,5 atm, mennyisége 1 kg/s. Ebben az összetételben a munkaközeg minimális hőmérséklete 2300 K, míg a maximális hőmérséklet 2900 K. Sózóanyagként  $K_2CO_3$  vizes oldatát használják, amelyet 0,5–1,5 atm nyomással juttatnak be az égőkamrába. Az így elérhető elektronsűrűség  $10^{12}$ – $10^{14}/cm^3$ . A munkaközeg vezetőképessége az égőkamrában a csatorna belépő nyílása felé tartva nő és eléri a 3–15 S/m-t.

A levegő előmelegítő ún. kavicságyas előmelegítő rendszer. Két külön tartályból áll, melyeknek saját égésterük van. A hőszigetelő köpeny  $ZrO_2$ , ill.  $Al_2O_3$ . Az előmelegítő két tartálya ciklikus üzemmódban üzemel. Az itt felhasznált tüzelőanyag mennyisége 20 gr/s metán és 100 gr/s levegő.

A csatorna téglalap keresztmetszetű, melynek hosszabbik oldala 200 mm szigetelő, míg rövidebbik oldala 60–80 mm elektróda fal. A hűtött fém szigetelő falon 40–50 W/cm<sup>2</sup> hőáramlás indult meg kifelé, ezért ma már MgO szigetelőfalakat használnak, amelyben a MgO téglák alatt vízhűtésű szegmentált réz tartólábak vannak. A vízhűtésű fém elektródákon meglehetősen nagy a feszültesítés, ezt idáig még nem tudták kiküszöbölni. A kerámia szigetelők anyaga újabban inkább  $ZrO_2$  és  $Y_2O_3$  keveréke. A „FIAN” intézetben előállítottak  $LaCrO_3$  szigetelőket is. SiC elektródafalakat is kipróbáltak, de ez csak 1700 K<sup>o</sup>ig volt megfelelő. Egy csatorna képe látható az 1. ábrán.



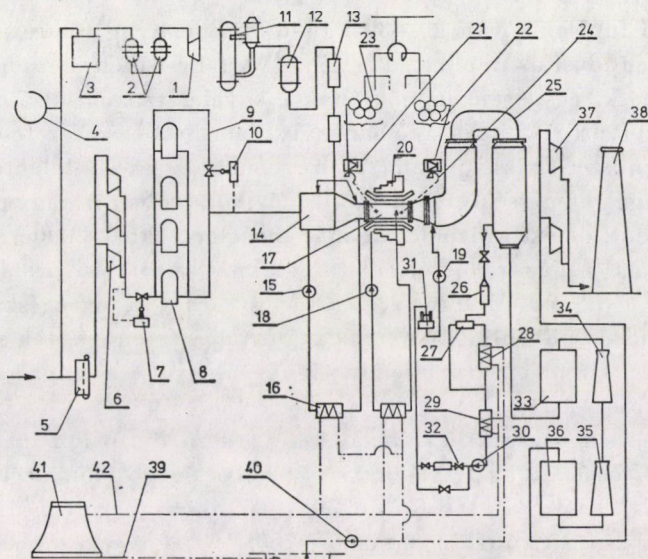
1/a ábra. Az U-02 egység egy csatornájának képe

A vízhűtésű réz elektródák élettartama elérte az 1000 órát, míg a Zr alapú anyagok élettartama mindössze 100 óra (eltörnek). Kellemetlen tapasztalat, hogy a szigetelőkre pár 100 óra működés után kiül a K és ez a csatornán belül söntöli a generátort. A sózás 50%-os folyadék oldat bepermetezésével történik. A konstrukció lehetővé teszi, hogy 1,5 m-re a csatorna bemenettől mind az áramlásra merőlegesen, mind vele párhuzamosan be lehet permetezni a sózóoldatot. A feltevések szerint az ionizáció 100%-os. A hőcserélőben lerakódó sózóanyagot vízfürdővel lemosják és kémiai úton visszanyerik. Az eltávozó égéstermékben levő sózóanyag leválasztására kidolgoztak egy rendszert, amely lehetővé teszi a sózóanyag 95%-ának visszanyerését. Jelenleg kísérletek folynak 75%-os sózóoldattal, amelyet 80 atm nyomáson és 420 K hőmérsékleten juttatnak a csatornába.

Az U-02 egység tapasztalatait felhasználva hozták létre a szovjet szakemberek az U-25 kísérleti MHD egységet, amely már alkalmas a nagy teljesítményű ipari méretű erőművek alapvető rendszertechnikai problémáinak modellezésére is. Az U-02 egység jelenleg elsősorban a nagy teljesítményű MHD csatornákhöz kidolgozott szerkezeti elemek élettartam vizsgálatára szolgál.

#### *Az U-25 egység*

Az addig elért eredmények felhasználásával 1966-ban kezdték tervezni az U-25 modell MHD erőművet és 1971-ben már üzembe helyezték. A tervzet szerint ez a modell közbenső lépés az ipari méretű erőművek felépítéséhez vezető úton. 20–25 MW összeteljesítményre tervezték, s már tartalmaz minden lényeges elemet, amely egy jövőendő MHD erőműben előreláthatóan szükséges lesz. A főbb szerkezeti elemek megegyeznek az U-02 berendezés elemeivel. Az U-25 berendezés felépítési sémája az 1. ábrán látható. Az ábrán feltüntetett szerkezeti elemek a következők: 1 — kompresszor, 2 — hűtőrend-



1. ábra.

szer, 3 — levegőelosztó, 4 — gáztartály, 5 — szűrőkamra, 6 — kompresszor, 7 — automata szabályzó, 8 — levegő előmelegítő, 9 — keverő, 10 — automata szabályzó, 11 — elpárologtató, 12 — adagoló, 13 — elosztó, 14 — égéskamra, 15 — kondenz szivattyúk, 16 — hőcserélők, 17 — MHD csatorna, 18 — kondenz szivattyúk, 19 — hőcserélő, 20 — mágnespólusok, 21 — inverterek, 22 — áramkivezető egységek, 23 — transzformátor, 24 — reaktor, 25 — gőzfejlesztő, 26 — gőzredukáló egység, 27 — szeparátor, 28 — kondenzátor, 29 — vízhűtő, 30 — vízszivattyú, 31 — atmoszférikus gáztalanító, 32 — tápszivattyúk, 33 — habkiválasztó egység, 34–35 — kétlépcsős turbulens gázmosó, 36 — cseppleválasztó ciklon, 37 — centrifugál ventilátor, 38 — kémény, 39 — meleg hűtővíz, 40 — hűtővíz szivattyúk, 41 — hűtőtorony, 42 — hideg hűtővíz.

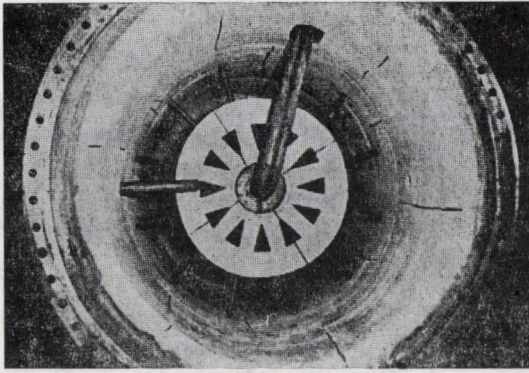
A levegő előmelegítőben atmoszférikus nyomású levegőt 40% oxigénnel dúsítanak, majd ezt sűrítik. Az előmelegítő, működési üzemmódját tekintve, regeneratív típusú. Az itt levő égőkamrában is földgáz üzemanyagot használnak, az előmelegített levegő hőmérséklete eléri az 1500 K-ot.

Az MHD generátor csatornája szegmentált Faraday-típusú. A jelenlegi mágnes hagyományos tekercselésű, 2 T erősségű mágneses tér előállítására alkalmas.

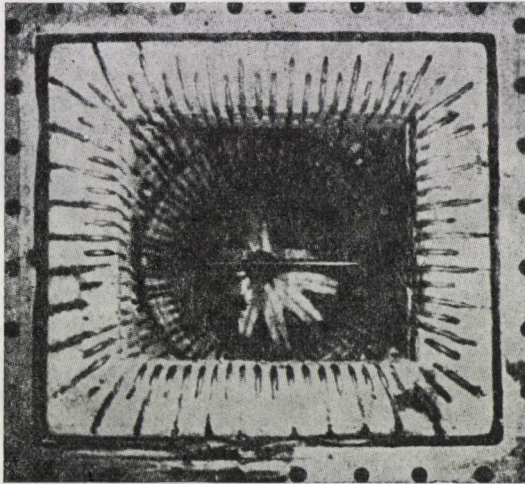
A hálózatra történő kapcsoláshoz kidolgoztak egy sokelemes invertert. A rendszer másik energiatermelő egysége egy nagyjából szabványos gőzfejlesztő. A hidromechanikus tisztítórendszerrel a sózóanyag több mint 99%-a visszanyerhető. Az elektródák és szigetelők rendszere modulált, vízhűtésű fémrendszer, ami természetesen nagy feszültségést és nagy hőveszteséget

okoz. Az első futások során  $20 \div 30$  kg/s-os tüzelőanyag felhasználás és  $30 \div 35\%$ -os oxigén dúsítás mellett  $1 - 1,5$  MW teljesítményt tudnak kinyerni a csatornából. Az egység üzemmódjának megválasztásánál elsősorban a megbízható üzemvitelre fektették a fő hangsúlyt, emellett természetesen méréseket végeztek a rendszer fizikai paramétereire vonatkozóan is. Jelentős problémát okozott a magas hőmérsékleten működő gőzfejlesztőben a nagymértékű sózóanyag lerakódás, de ezt a problémát már megoldották. A  $2000$  V körüli üzemi feszültség miatt a magas hőmérsékletű falaknál szigetelési problémák jelentkeztek, ezért  $1972$ -ben újra méretezték a csatornát és az égéskamrát. Ezzel  $3$  órás folytonos üzemben  $4,5$  MW maximális teljesítményt értek el. Javították a gázdinamikai áramlás paramétereit, figyelembe véve a mágneses térrel való kölcsönhatást is.

Az  $1974$ -ben használt csatorna a következő fontosabb paraméterekkel jellemezhető: tüzelőanyag felhasználás  $40$  kg/s; levegő előmelegítés  $1550$  K; oxigén dúsítás  $40$  súly%; Hall-feszültség  $3$  kV; üzemi feszültség  $1200 \div 1500$  V; feszültségesés az elektródák mentén  $6 \div 700$  V. A következőkben részletesen ismertetjük az U-25 berendezés legfontosabb adatait és az itt alkalmazott fontosabb mérési módszereket. Mint már említettük, az U-25 berendezést  $1966$ -ban kezdték tervezni. A szabványos részeket a leningrádi kutatóintézetekben tervezték, de azokat is az IVTAN-ban készítették el. A tervezet szerint a csatorna munkahőmérséklete  $3300$  K, amivel  $10$  S/m vezetőképesség érhető el. Atmoszférikus nyomású levegőben történő elégetéssel csak kb.  $2300$  K hőmérséklet érhető el, ezért alkalmaznak  $40\%$  oxigén dúsítást. A tüzelőanyagként felhasznált földgáz mennyisége  $20$  kg/s és ezt szintén előmelegítik. Ezután a  $4,5$  atm nyomásra komprimált levegőt és az ugyanilyen nyomású földgázt összekeverik. Gyújtóegységre nincs szükség, mivel ezen a hőmérsékleten már öngyulladás lép fel. A felhasznált levegő előmelegítő a kohóknál szokásossal megegyezőek.  $4$  db levegő előmelegítő van, amelyek sorosan és párhuzamosan is üzemeltethetők. Az előmelegítő felhevítése kb.  $2,5$  órát vesz igénybe és  $1$  óráig tart, amíg a felhevítendő levegő áthalad rajta. Az áthaladás után a hideg adalékok (sózóanyag) kb.  $50$  K-kal lehűtik a levegőt. A sózóanyagot, amely a szokásos  $K_2CO_3$  oldat,  $3$  különböző helyen juttathatják be a munkagázba: a levegő előmelegítőben, az égőtérben és a csatornában. Az öngyulladás után az égőkamrában  $2800$  K-on megy végbe az égés. Az égéstermékek  $0,9$  Mach sebességgel áramlanak be a csatornába, amely kb.  $950$  m/s sebességnek felel meg. Az égéskamrának két fajtáját próbálták ki: a hidegfalú és a melegfalú változatot. A hidegfalú változatban a fal hőmérséklete kb.  $900$  K, a konstrukció stabil égést biztosít. Az égőtér több pontján lehetséges a sózóanyag bevitele. A hőveszteség  $5 \div 6\%$ .  $50$  kg/s tüzelőanyag felhasználás esetén  $2,75$  atm nyomáson  $300$  MW-os hőtéljesítmény érhető el. Ez a típusú égőkamra nem IVTAN konstrukció, ma már nem használják. A melegfalú változatot az IVTAN-ban tervezték és készítették el. A szigetelő kerámia-

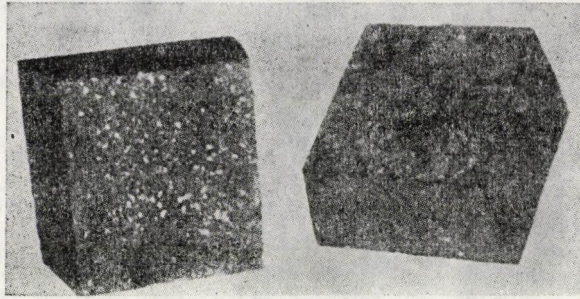


2. ábra. Az U-25 egység égőkamrája

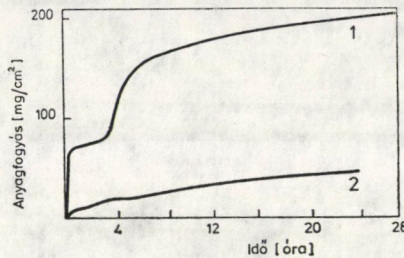


3. ábra. Az U-25 egység égőkamrájának fúvókája

téglák 3300 K üzemi hőmérsékletre készültek, anyaguk  $ZrO_2$ . Az égőkamra hengeres keresztmetszetű, külső átmérője 1700 mm, míg a kiáramló nyílás előtti belső átmérő 1100 mm. A kiáramló nyílás szintén téglalap keresztmetszetű és a csatornához illeszkedő. Az égőkamra belsejéről készült fényképfelvétel a 2. ábrán látható. A levegő és a gáz áramlása egymásra merőleges, így az elrendezés jó keveredést biztosít. A sózóanyagot az áramlásra merőlegesen juttatják be az égőfejbe. Szintén 50 kg/s-os tüzelőanyag felhasználás esetében, de 5 atm nyomáson 300 MW-os hőteljesítmény érhető el, a hővesztés azonban mindössze 3%. A fúvókában lehetőség van optikai mérések végzésére és a nyomás-pulzálás vizsgálatára. Az égőtér kimenete  $380 \times 760$  mm-es téglalap keresztmetszetű szűkület. A fúvóka képe a 3. ábrán látható.



4. ábra.  $ZrO_2-Y_2O_3-Nd_2O_3$  egykristály alapanyagú meleg elektródák



5. ábra

A csatorna szekcionált Faraday-típusú generátor. Az elektródák közötti feszültség 1000 V nagyságrendű, de a csatorna eleje és vége között 5000 V-os feszültségekülönbség is felléphet. (A csatorna kimenete földelt.) Ezt az egyenfeszültséget tirisztoros inverterekkel 10 kV-os, háromfázisú, váltakozó feszültséggé alakítják, ami már a hálózatra csatlakoztatható. A csatornában 48 elektródapár van, míg a továbbfejlesztett csatornaváltozatban lényegesen több elektróda kerül beépítésre. A 4. ábrán két  $ZrO_2-Y_2O_3-Nd_2O_3$  egykristály alapanyagú meleg elektróda látható. A meleg elektródákat különböző technológiával állítják elő. A tapasztalat szerint a robbantással sajtolt elektródák tulajdonságait a sajtolás utáni hőkezelés nagymértékben javítja. Az 5. ábrán a hőkezelt és hőkezeletlen elektródák anyagfogyása hasonlítható össze (1. görbe hőkezeletlen, 2. görbe hőkezelt elektródák). A szigetelők vízhűtésű fém modulok, amelyek egyesével is cserélhetők. A legnagyobb, jelenleg kivitelezés alatt álló csatornát 25 MW-ra méretezték. Az ezen átáramló tüzelőanyag mennyisége el fogja érni az  $50 \div 60 \text{ kg/s}$ -ot is. Az 1974-ben üzemeltetett csatorna méretei: a belépő keresztmetszet  $383 \times 766 \text{ mm}$ , a kilépő keresztmetszet  $1413 \times 383 \text{ mm}$ , hosszúság 6,3 m. A számítások szerint a csatorna keresztmetszetében a gáz áramlási sebessége állandó, míg a hossz mentén a mérések szerint a bemenetnél 2,75 atm nyomáson 900 m/s, közepén 600 m/s, a kilépésnél kb. 1 atm nyomáson 800 m/s a sebesség. A teljes generátoregység átmérője (mágnessel együtt) 8 m. A mágnes teljesítményfelvétele 5 MW, segítségével 2 T erős-



ségű homogén mágneses tér hozható létre a csatorna teljes hosszában. Az egységben már több csatornát próbáltak ki. A 4 MW teljesítményt adó csatorna tüzelőanyag fogyasztása 30 kg/s, míg a 7 MW teljesítményt adó csatorna tüzelőanyag fogyasztása 40 kg/s volt. Ez utóbbi csatornát egyébként 9 MW-ra tervezték. A futási idő összesen több száz óra volt. Az eltávozó munkagáz hőmérséklete eléri a 2000 °C-ot. A benne levő hőmennyiséget egy hagyományos gőzfejlesztőben hasznosítják. A gőzgenerátorban a víz nyomása 230 atm, mennyisége 250 t/óra, ezt alakítja át 100 atm nyomású, 840 K-os hőmérsékletű gőzzé. A sózóanyag visszanyerését ellenáramú rendszerrel biztosítják. Ebben a K-t hideg levegővel csapatják ki. Ezenkívül alkalmaznak egy speciális fémsörétes tisztítórendszert, amely segítségével a végül is kb. 400 K-ra lehűlt égéstermékekből a K visszanyerése 99,9%-os.

Látható tehát, hogy a szovjet MHD egységek segítségével a kutatók elértek az ipari méretű erőművek megvalósításában jelentkező problémákhoz. Ezek megoldása után sor kerülhet az első nagy teljesítményű MHD erőmű felépítésére.

### MARK VI—VII egységek

Az Amerikai Egyesült Államokban az MHD generátorokkal kapcsolatos kutató és fejlesztő munkálatokat elsősorban az Avco Everett Corp. kutató laboratóriumaiban végzik, a Mark VI—Mark VII elnevezésű generátorokon, amelyek az U-25-ös után a legnagyobb teljesítményű ilyen típusú kísérleti berendezések. A Mark VII egység méreteit tekintve, hasonló a Mark VI-hoz, sőt a mágneses rendszer és a vízűtés is azonos. Az eltérés inkább a kutatási célkitűzésben van: amíg a Mark VI a szerkezeti elemek élettartam vizsgálatára készült, addig a Mark VII egységen elsősorban a viszonylag rövid ideig működő nagy teljesítményű kompakt MHD-generátorok aerodinamikai és villamoságtani problémáit kívánják tanulmányozni. Az alábbiakban elsősorban a Mark VI egység ismertetésére korlátozódunk.

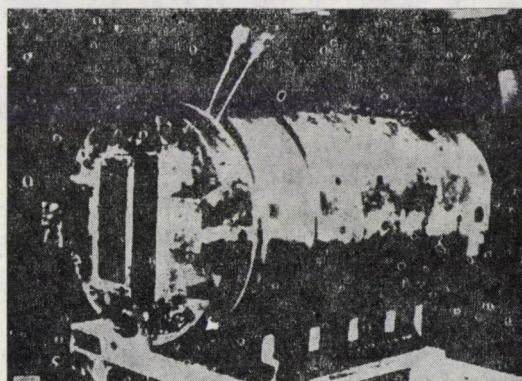
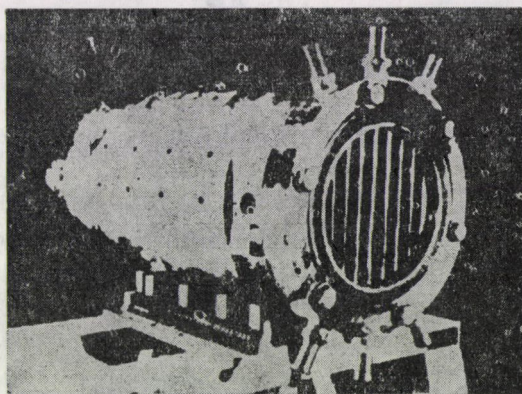
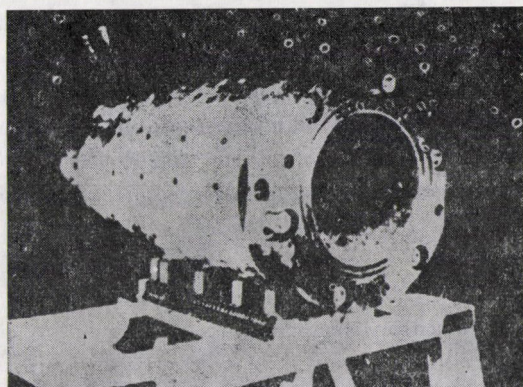
A Mark VI generátor kb. 3 kg/s gázfogyasztás mellett kb. 500 kW villamos teljesítmény termelésére alkalmas, s elsősorban a csatorna kritikus elemeinek — az elektródák — élettartam vizsgálatára, valamint az MHD áramlási viszonyok tanulmányozására szolgál. A csatorna méretei ugyanakkor lehetővé teszik, hogy az ott kapott eredmények az ipari méretű berendezésekben is felhasználhatók legyenek.

A Mark VI generátor munkaközege az égéskamrába juttatott könnyű fajsúlyú kőolaj, amelynek elégetése  $N_2O_2$  közegben történik. Mivel a gáz keveréket külön  $O_2$  és  $N_2$  tartályokból adagolják, így a kísérletek során folyamatosan változtatni lehet az  $N_2/O_2$  arányt. A jelenlegi körülmények között az egység a tervezett paraméterek biztosítása mellett 8 órás üzemeltetési idő alatt 11 tonna tüzelőanyagot és oxidáló közeget fogyaszt.

A megfelelő vezetőképesség biztosítására a füstgázhoz egy súlyszázalék káliumot adagolnak vagy 50%-os vizes oldatban, vagy pedig porított állapotban. A folyékony oldatot az égéskamrába való bejuttatás előtt keverik össze a tüzelőanyaggal. A kísérletek során azonban bebizonyosodott, hogy a vizes oldat formájában történő bejuttatás hátrányos a disszociációs és párolgási veszteségek miatt, s így a későbbiek során egy vibrátoros, száraz por formájában adagoló rendszer mellett döntöttek. A száraz adagoló 10% nitrogén segítségével juttatja be a rendszerbe a kálium sózanyagot. A kísérletek során kiderült, hogy a száraz adagoló rendszer kb. 50%-kal növelte meg a füstgáz vezetőképességét az oldat formájában történő sózáshoz képest. De még így is csak felét lehetett elérni a megfelelő határfokhoz szükséges vezetőképességnek.

Az egységénél az egyik legnagyobb problémát a megfelelő égőkamra-konstrukció kialakítása jelenti. Mivel a vezetőképesség elsősorban a gázhőmérséklettől függ, így 100 K gázhőmérséklet csökkenés már 50%-kal csökkenti a Mark VI egységben a munkaközeg vezetőképességét. A Mark VI kísérletek során egy rakétahajtóműből kifejlesztett égőkamrát alkalmaztak. Az égőkamra képe a 6a, b, c ábrán látható. Az oxidáló szert és a tüzelőanyagot az ipari égőfejeknél szokásos expanziós fúvókák segítségével juttatták be. Itt a legnagyobb problémát az jelenti, hogy a radiális irányban befecskengett tüzelőanyag az expandáló gázba jut be, s ennek következtében a széleken egy feldúsult zóna alakul ki, közepén pedig elszegényedés lép fel. A rossz keverési viszonyok miatt ily módon hosszú, 1720 mm-es égéskamrát kellett kialakítani, amelynek következtében természetesen megnövekednek a hővesztések. Kísérletek történtek az injektor konstrukciójának megváltoztatására, valamint az égőtérbe szinterelt cirkónium terelőlapok beillesztésére. Ennek eredményeként a generátor kimenő teljesítménye közel 600 kW-ra emelkedett (a jó tüzelőanyag-oxidálószer keveredés és a fajlagos fali veszteségek csökkenése következtében). A későbbiek során azonban ez a megoldás nem nyert alkalmazást, mivel a cirkónium kerámia terelők élettartama csak néhány ciklusra volt elegendő. A további kísérletek során az AVCO által kifejlesztett égőkamra konstrukciót alkalmazták, amely 10 cm széles, vízzel hűtött berillium-réz gyűrűkből állt. Ily módon az égőtér hossza 60 cm-re volt csökkenthető, s ugyanakkor egyes gyűrűk kivételével, ill. beépítésével lehetőség nyílt az optimális üzemi tartomány kis lépésekben történő beállítására. Az új konstrukcióval végzett vizsgálatok során kiderült, hogy a kálium-karbonáttal sózott gáz vezetőképessége az égéskamrában 10–12 S/m között változott s az égés majdnem tökéletes volt — szénmonoxid nem alakult ki.

A Mark VI-os egység jelenleg két csatornával rendelkezik, amelyek főbb paramétereit tekintve, hasonlóak egymáshoz. Közepes keresztmetszetük 232 cm<sup>2</sup>, hosszúságuk 203 cm (165 cm-es aktív hossz). Felépítésüket tekintve Faraday-rendszerűek, s a négy egymástól elszigetelt fal alkotja a csatornát. A cserélhető falakon 180 db 1 cm átmérőjű, rúd alakú elektróda van elhelyezve,



6. ábra

az elektródák közötti távolság 1,5 mm, s a vízzel hűtött elektródok között szigetelő kerámia betétek vannak. Az elektródok munkafelülete a rendelkezésre álló információk szerint kalciummal doppolt cirkóniumoxid kerámia réteg, amely 1400 ÷ 1900 K hőmérsékleti tartományban üzemel optimálisan, mivel ezeken a hőmérsékleteken a cirkónium viszonylag jó vezetőképességgel rendelkezik, s az elektróda leépülési folyamatok mértéke is elviselhető. A fém-kerámia átmenetnél 1400 K hőmérsékletnél adódik a minimális átmeneti ellenállás.

Az eredeti, A jelzésű, és az újabban kidolgozott B jelzésű csatornaváltozat között két alapvető különbség van:

a) A hűtővíz és a villamos csatlakozások a B csatornánál minden egyes elektródához külön vezetéken történtek, s csak külső összeköttetéseket alkalmaztak, míg az A csatornában közös volt az elektródák vízhűtő rendszere.

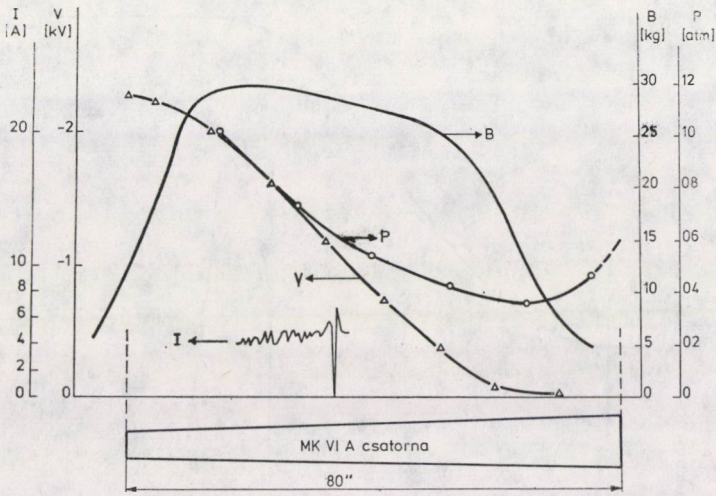
b) A B csatornánál a bemenő Mach-számot a korábbi 2-ről 1,5-re csökkentették.

A Mark VI-os egység mágnesének két nyereg alakú gerjesztőtekercesze vízűtősű vörösréz csövekből van tekercselve. A mágnes pólusok között kialakuló maximális térerősség 3 T. A közelmúltban készült el egy 5 T térerősségű szupravezető mágnes, amely jelenleg még a próbaüzemeltetés stádiumában van.

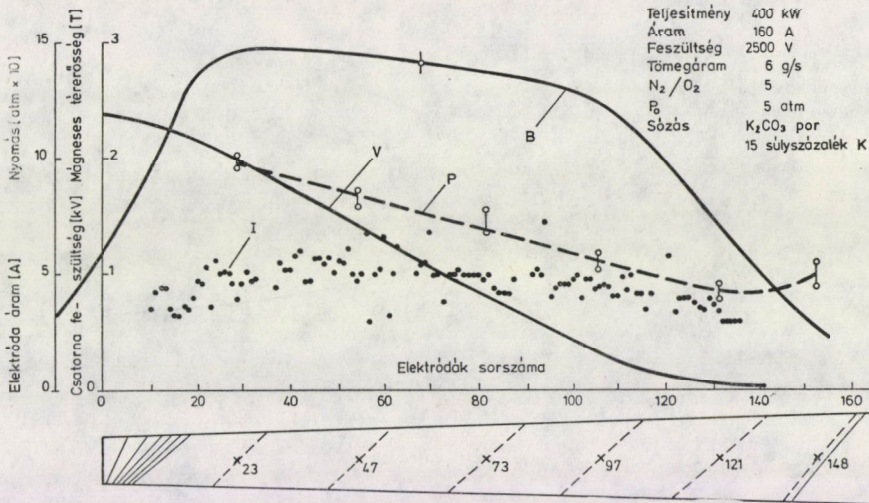
A kísérleteket folytató AVCO-Everett Research Laboratories lakott területen való elhelyezkedése és a levegőszennyezéssel kapcsolatos problémák egyébként is növekvő fontossága miatt az amerikai kutatók nagy figyelmet szenteltek a szóanyag visszanyerésére és az égéskamrából, valamint az elektróda porlódásból származó kerámiaport tartalmazó égéstermékek tisztítására. Az égéstermékek először egy diszpergáló düzni és diafragmarendszeren haladnak át, majd egy hagyományos ciklonba jutnak, ezt követi egy cseppleválasztó, majd egy második centrifuga, mielőtt a füstgáz egy venturicsövön keresztül a szabad kevegőbe jut.

A központi vezérlőteremben elhelyezett berendezések segítségével folyamatosan ellenőrizhető a tüzelőanyag és az oxidáló szer mennyisége, az égés folyamata, a nitrogén – oxigén és a szóási arány, valamint a mágneses térerősség értéke. A mérőműszerek ezenkívül folyamatosan vagy szakaszosan kijelzik a csatornában és a diffuzorban uralkodó nyomáseloszlást, a csatorna falának, az égőnek, a fűvőkának, valamint a diffuzornak a hűtésére szolgáló víz hőmérsékletét, az egyes elektródák áramát, az elektródok közötti feszültségkülönbségeket, a kimenő feszültséget és a terhelési áramot, továbbá az axiális feszültségeloszlást.

A rendelkezésre álló adatok szerint a Mark VI A csatornája 1973-ban 116 órát üzemelt, s ebből 65 óráig átlagosan 250 kW villamos teljesítményt szolgáltatott, a B jelzésű csatorna pedig 39 óráig működött, s ebből 20 óráig átlagosan 350 kW villamosteljesítménnyel. Ez egyben azt is jelenti, hogy



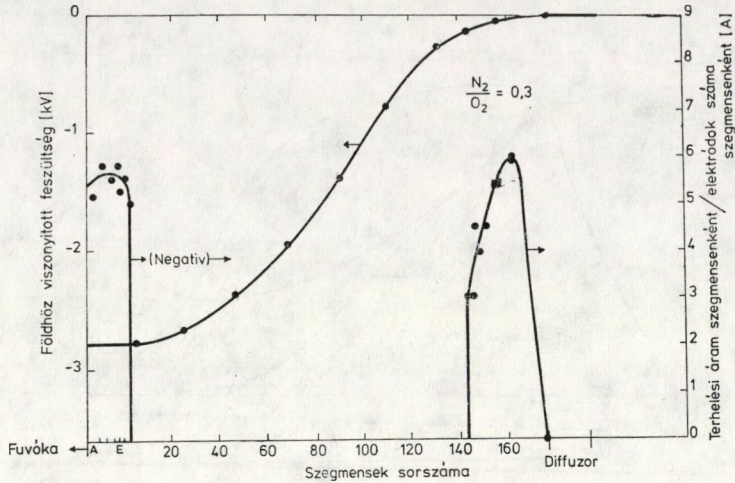
7. ábra



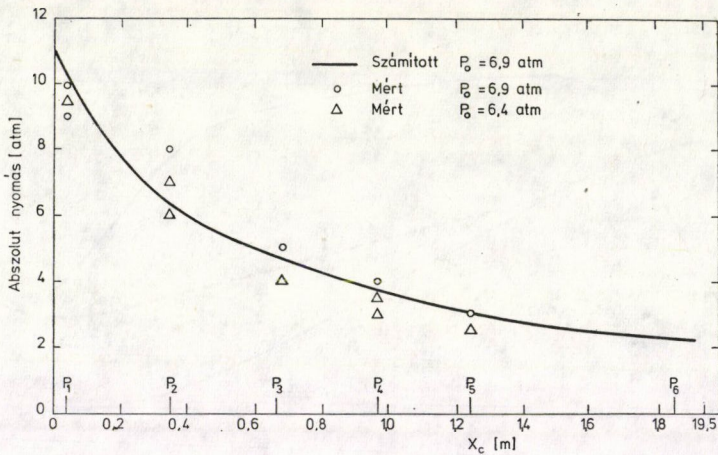
8. ábra

a Mark VI kísérleti MHD rendszer 23 000 kW ó össz villamos energiát szolgáltatott 1973-ban.

Az A és B csatorna működési körülményeit a 7. és 8. ábra segítségével illusztráljuk. A 7. ábrán 310 kW villamos teljesítmény mellett mutatjuk be az A csatorna hosszában uralkodó nyomás, térerősség, feszültség és áram eloszlásokat. A 8. ábrán láthatók a B csatornában — 400 kW villamos teljesítmény mellett — fellépő hasonló paraméterek. Az elméleti számítások és



9. ábra



10. ábra

a kísérleti úton mért értékek kielégítő egyezését jól illusztrálja a 9. és 10. ábra. A 9. ábra az *A* csatorna számított és mért áram- és feszültségeloszlását, míg a 10. ábra a csatornában uralkodó nyomás eloszlásának számított görbéjét és a mért nyomásértékeket mutatja be.

A csatorna üzemeltetése során az anód környezetében fellépő ívkialakulási jelenségek jelentették az alapvető problémát. Az anódnál ugyanis az áram és a mágneses tér vektorszorzatával megadható Lorentz-erő az elektronáramot a fal felé hajtja, így elősegíti az ív kialakulását. Az *A* jelzésű csatorna kezdeti üzemeltetési stádiumában a vízhűtés gyakori meghibásodása következtében

nem lehetett elkülöníteni a hűtőrendszerrel és az ívkialakulással kapcsolatos problémákat. Éppen ez tette indokolttá a *B* jelzésű csatorna konstrukciójának kialakításakor a külső, független vízű rendszer alkalmazását. Ezen változtatással egyidőben tökéletesítették a falak szigetelését (epoxi-üveg szigetelőlapokról áttértek teflon és G7-es jelzésű szilícium-üveg kombinációra) s az árameloszlás homogenizálása érdekében aszimmetrikusan szegmentált anód konfigurációt vezették be, sőt a Joule-veszteségek egyenletesebb disszipálása miatt növelték az áram kollektorok méretét is.

A fenti munkáknak és kísérleti eredményeknek elsősorban az MHD-erőművek létrehozásához szükséges új konstrukciós anyagok kidolgozása szempontjából van igen fontos jelentősége. Figyelembe véve, hogy az USA-ban létrehozott konstrukciós anyagok és megoldások iránt támasztott követelmények az ipari méretű erőművekben várhatóan módosulnak, ezért az eredmények végleges értékelése csak a min 25–50 MW teljesítményű berendezésekben történő kipróbálás után végezhető el.

### *Mérési és ellenőrzési módszerek*

A komplex MHD rendszerek paramétereinek folyamatos követése és regisztrálása jelentős mérés technikai problémákat vet fel, amely egyrészt a már meglévő diagnosztikai módszerek speciális körülményekre (magas hőmérsékletek, nagy mágneses és villamos térerősségek, nagy geometriai méretek stb.) történő alkalmazásában, másrészt pedig a mért paraméterek egyidejű folyamatos regisztrálásában, feldolgozásában és az automatikus visszacsatolás megvalósításában rejlik. Ebből a szempontból is élenjárónak tekinthető a SZU Magashőmérsékletű Intézetében megépített U-25-ös kísérleti egység, ahol már komoly eredmények születtek a különböző mérőberendezések komplex rendszerbe történő integrálása terén. Ebben a rendszerben az egyes mérőegységek által szolgáltatott adatokat nagy teljesítményű számítógépek segítségével dolgozzák fel, s a kísérleti erőmű vezérlőtermében jól áttekinthető formában már a származtatott „erőmű paraméterek” kerülnek kijelzésre.

Az alábbiakban röviden áttekintjük a korábbiakban ismertetett MHD berendezéseken alkalmazott fontosabb mérési módszereket és utalunk néhány kidolgozás alatt álló, érdeklődésre számot tartó módszerre is.

Az U-25-ös csatornájában az áramló plazma hőmérsékletét spektrográffal vagy UM-2 monokromátorral mérik. A mérés távirányítható és egy analóg-digitál átalakító segítségével az adatok közvetlenül számítógépre vihetők. A mérést három lépésben végzik. Első lépésként wolfram etalon lámpával felveszik az alap színeképet egy fotomultiplier segítségével. Ezután külön felveszik a plazma színeképet, majd a plazma és az etalonlámpa együttes színeképet. Az így kapott színeképeket, ill. a színeképek megfelelő vonalát analóg számítógéppel értékeli ki, ez egy közvetlen kijelzőn keresztül mutatja a

csatorna pillanatnyi hőmérsékletét. Meg kell jegyezni, hogy a módszer csak átlaghőmérsékletre ad felvilágosítást. A szovjet kutatók számításai szerint egy igen vékony határrétegtől eltekintve a hőmérséklet a csatorna keresztmetszetében állandó, így az átlaghőmérséklet megegyezik a valóságos hőmérséklettel. A csatorna bemeneténél és kimeneténél állandóan mérik a gáz hőmérsékletét, míg a csatorna középső szakaszán időszakosan végeznek méréseket. Az optikai ablakok kvarcüvegből készülnek és átmérőjük 100 mm.

A szóanyag — a kálium — koncentrációját a kálium színkép-vonalainak öninverziójából számítják. A kálium koncentráció és a hőmérséklet ismeretében — valamint a statikus nyomás mérésével — számítják az elektronkoncentrációt és a vezetőképességet. 10 s-onként végeznek egy mérést, amely 50 Å-ös sávokban tapogatja le a színképet. A megfelelő időfelbontás eléréséhez nagy sebességű filmkamera is rendelkezésre áll. Elméleti próbálkozások folynak az égéstermékek fizikai és fizikokémiai folyamatainak hőmérsékletre és vezetőképességre gyakorolt hatásának leírására.

A csatorna szerkezetének vizsgálatára piezoelektromos mérőfejekkel pulzációra és vibrációra vonatkozó méréseket végeznek. A mérőfejek kalibrálása után a jeleket oszcillográfon rögzítik.

A plazma vezetőképességnek mérésére nagyfrekvenciás vezetőképességmérő szondákat alkalmaznak. A módszer azon alapszik, hogy egy 2 MHz-es rezgőkör plazma által történő elhangolását oszcillográffal detektálják. Az elmélet szerint a rezgőkör jósági tényezőjéből megállapítható a plazma vezetőképessége. A mérőfej hosszanti és spirális tekercselésű kivitelben készül, teflon bevonattal, amely 20—25 mérést bír ki. A mérőfejet elektrolit oldatban hitelesítik. A mérés az égőkamra és a csatorna plazmájában egyszerre több helyen végezhető, a mérőfej bemerítését haidraulikus működtetésű mechanizmus végzi, amely 0,5 s alatt 250 mm-re meríti be a szondát.

Az elektrosztatikus szondákkal történő mérés kísérleti stádiumban van. Jelenleg kisátmérőjű gázlángon végeznek méréseket, amelyet megfelelő arányban káliummal sóznak. A szondát kör alakú pályán mozgatják, amely így egy sík metszetben keresztülhalad a lángon. A feltevések szerint a szonda áthaladási sebessége kisebb, mint az elektronok sebessége. Az áthaladás időtartama alatt egy szinkronizált impulzusadó néhány tized mikroszekundumos háromszög alakú impulzust ad a szondára. A létrejövő V—A karakterisztikát a szokásos módon a diffúziós elmélet egyik változata alapján értékeli ki és a mérést spektrográffal ellenőrzik. A tapasztalatok szerint a kialakuló szonda-karakterisztikára jelentős befolyással van a szonda áthaladási sebessége (amely analóg a plazmaáramlási sebességének befolyásával), az ionok becsapódási sebessége a szondára, a lebegő potenciál stb. A karakterisztika elektron szakaszából a hőmérséklet állapítható meg, míg az ionszakaszából az elektronkoncentráció. Ez utóbbi meghatározására a diffúziós és a diffúziómentes elmélet alkalmazása esetén más és más számítási módszert kell követni. A jelenlegi



eredmények szerint a módszer elvben alkalmazható a nagyobb tömegű, nagyobb kiterjedésű MHD plazmákra is, azonban a végleges alkalmazáshoz még igen sok technikai és elméleti problémát kell megoldani.

Laboratóriumi mérések stádiumában vannak a hőmérséklet és más plazma paraméterek meghatározásának egyéb spektroszkópiai módszerei is. A szovjet kutatók mérései szerint az MHD csatorna plazmájában a színkép-vonalakra 100 Å nagyságrendű vonalkiszélesedés jellemző. Ez a jelenség ma még elméletileg nem tárgyalt. Feltehető, hogy a kiszélesedés okainak feltárása megoldja a plazma paraméterek mérésének legfőbb problémáit. Hasonlóan új típusú mérés az MHD csatorna plazmájában levő kálium atomok és ionok színkép-vonalainál az elnyelési tényező hullámhossz függésének vizsgálata. A mérések jó kézben tarthatóságának érdekében atmoszférikus nyomású védett fáklyában végeznek etalon méréseket. Ezzel a módszerrel biztosítani tudják, hogy a mérendő színkép-vonalak hullámhosszának megfelelő fény homogén optikai vékonyrétegen haladjon át. A fáklyában  $10^{11} \div 10^{14}/\text{cm}^3$  elektronsűrűséget tudnak beállítani. Ezek a mérési módszerek ma még nem alkalmasak üzemi ellenőrző módszerként.

Az IVTAN más kutatórészlegeiben is jelentős kutatásokat végeznek az MHD generátorokkal kapcsolatos fizikai folyamatok és tulajdonságok mérésére vonatkozólag. A gázok és folyadékok fizikájával két-két laboratórium foglalkozik, melyek a termodinamikai állandókat és a transzportfolyamatokat vizsgálják. Itt elsősorban a folyadék állapotú alkáli fémek sűrűségének, entalpiájának, vezetőképességének, fajhőjének, hővezető képességének és más tulajdonságainak mérését említjük meg. Ezenkívül a folyékony szerves anyagok, elsősorban a  $10 \div 20$  H atomnál többet tartalmazó szénhidrogének vizsgálata fontos még, amelynek az MHD generátorok új típusú tüzelőanyaga szempontjából van jelentősége.

Az MHD villamos energiaátalakítással foglalkozó amerikai intézmények ugyancsak nagy figyelmet fordítanak az MHD csatorna optimalizálásához elengedhetetlenül szükséges olyan diagnosztikai módszerek kifejlesztésére, amelyek lehetővé teszik a csatornában uralkodó hőmérsékleti, nyomás és áramlási viszonyok, valamint térerősség eloszlások meghatározását. A számos diagnosztikai módszer közül a Stanford Egyetemen alkalmazott spektrális hőmérséklet és elektronsűrűség eloszlás mérési módszert emeljük ki, amely a kidolgozó szakemberek szerint egyensúlyi és nem egyensúlyi plazmákra egyaránt alkalmazható.

A módszer alapját HONSTREITER egy korábbi munkája képezi és lényegében a K rezonanciavonalak inverziójának abszolút mérésén alapul. 19 kálium vonalra írták fel a sugárzási transzport egyenletet és megadták a numerikus kiértékelési módszert is, lehetőséget teremtve arra, hogy a méréseket a korábbiakban alapvetően befolyásoló hideg határretek torzító hatását kiküszöböljék a detektor által érzékelt vonal mentén mért össz sugárzásból. A módszer

lehetővé teszi ugyan a csatorna belsejében fennálló integrált hőmérsékleti viszonyok korábbiaknál pontosabb meghatározását, alapvető hátránya azonban az, hogy nem alkalmazható az elektród a leépülés szempontjából fontos szerepet játszó határretegek vizsgálatára. Az elektronhőmérséklet mérésnél előnyösen alkalmazható az a feltételezés, hogy a magasan fekvő kálium energiaszintek betöltöttsége egyensúlyban van a szabad elektronok energiaeloszlásával, s ily módon a Saha-egyenlet felhasználásával a hőmérséklet mérésen keresztül meghatározható a sűrűségeloszlás is. Nem egyensúlyi esetben a felállított modell alapján az egyes vonalakra felírt sugárzási transzport egyenletek numerikus megoldásával kiválaszthatók azon energiaszintek, amelyek egyensúlyban vannak a szabad elektronokkal, s ily módon felhasználhatók a sűrűség meghatározására is. A mérés gyakorlati kivitelezése scanning monochromátorral és kvantitatív fotometriával történik, közelítő mérésekhez azonban elegendőnek tűnik a monochromátornak egyszerű interferencia szűrőkkel történő helyettesítése is.

Mint már a fentiekben is említettük, a gázdinamikai határretegeknek és az elektromágneses tér határretegekre gyakorolt hatásának rendkívül fontos jelentősége van az MHD csatorna konstrukciós kialakítása szempontjából. A turbulens határreteg struktúrája határozza meg ugyanis a fali súrlódás és a hőátadás mértékét és ezen keresztül pedig az elektróda leépülési folyamatok sebességét, amely jelenleg még a legnagyobb problémát jelenti az ipari méretű erőművek megvalósítása útján. Az amerikai szakemberek a határreteg sebesség-profil és a turbulencia intenzitás meghatározására, és a számítógépes eredmények ellenőrzésére egy komplex Doppler-elven alapuló lézeres sebesség-mérő berendezést fejlesztettek ki. A berendezés kipróbálása jelenleg folyik, elsősorban modell közegeken, mivel az MHD csatorna munkaközegében történő méréshez még számos lényeges problémát kell megoldani, amelyek közül csak néhányat említünk: nehéz optikai hozzáférhetőség; nagy sebességek (500 m/s); magas hőmérséklet (2700 K); nagy térfelbontási igény (0,1 mm); a turbulens határreteg törésmutató inhomogenitása; valamint a határfelület közvetlen közelében a szóródásból eredő interferencia jelenségek; továbbá a mikroszkopikus szóanyag jelenlétéből következő szórási jelenségek (kb. 1  $\mu$ -os szemcsék).

Sugárforrásként egy 5145 Å hullámhosszra hangolt, egymódusú argonion lézer szolgál. A frekvencia eltolódás mérésére egy piezoelektromos hangolású konfokális Fabri—Perot-interferométert alkalmaznak.

225 m/s-os számított szabad áramlási sebesség mellett vizsgálták a 0÷20 mm-es határreteg tartományt; a faltól 12,3 mm távolságra az áramlási sebesség már jól megközelíti az elméleti úton számított szabad áramlási sebességértéket.

A kísérleti MHD egységeknél alkalmazott mérés technikai módszerek áttekintése és az U-02 kísérleti MHD egységeken szerzett tapasztalatok alap-

ján megállapíthatjuk, hogy jelenleg még nincsenek teljes részletességgel kidolgozva olyan mérési módszerek, amelyek segítségével folyamatosan követni lehet az ipari méretű MHD erőművek csatornájában lejátszódó folyamatokat és ezen keresztül a villamosenergia termelés szempontjából alapvetően fontos üzemi paramétereiket.

### 3. Ipari méretű MHD erőművek

Az MHD kutatás jelenlegi szakaszában — az ipari méretű villamos erőművek kezdeti tervezési stádiumában — már igen fontos szerep jut a különböző rendszeranalitikai munkálatoknak és számításoknak, ezek eredményeként születnek meg a konkrét erőmű elképzelések. A legtöbb ilyen jellegű munka az előmelegített levegő jelenlétében elégett szénnel üzemelő MHD-erőművekre vonatkozik.

Jelenleg és előreláthatólag még hosszabb ideig az alapvető energiatermelő egységek a hagyományos tüzelőanyaggal működő hőerőművek lesznek. Ezek fejlesztésében a fő problémát a környezetbe kiáramló hőveszteség csökkentése révén az erőmű hatásfokának növelése jelenti. Gazdasági számítások szerint az MHD generátorok a fajlagos energiaköltség tekintetében is felveszik a versenyt a hagyományos erőművekkel. E szerint az MHD erőművek elkészítendő első generációjában a hatásfok eléri és túlhaladja az 50%-ot, miközben a fajlagos tüzelőanyag fogyasztást 20 ÷ 25%-kal lehet redukálni. A második generáció hatásfoka eléri és túlhaladja a 60%-ot, miközben a fajlagos hűtővízfogyasztás 2/3-ra csökken. Ezen szempontok figyelembevételével a fajlagos tüzelőanyagköltség az MHD erőműveknél jóval alacsonyabb lesz. További előnye az MHD erőműveknek, hogy egy nagy teljesítményű blokknak a felépítése a hasonló teljesítményű hagyományos hőerőművéknél egyszerűbb. Amennyiben regeneratív előmelegítő helyett oxigén dúsítót alkalmazunk az MHD erőműben és elhagyjuk a kiegészítő gőzerőművet, akkor egy igen gyors felfutású csúcserőművet kapunk. Bár az MHD erőművek csúcsüzemű erőműként való használata esetén a hatásfok valamelyest csökken, a hagyományos csúcserőművekhez képest, így is jobb hatásfokot érhetünk el. Egy ilyen csúcserőmű jellemzője, hogy igen jól illeszthető a hálózathoz, viszonylag kevés speciális berendezést igényel. Jellemzői alapján a közepes méretű energia-termelő egységek közé tartozhat.

A rendszertechnikai problémákon túlmenően a nyitott ciklusú MHD erőműben a hatásfok erősen függ az elérhető munkagáz hőmérséklettől, az égőkamra, a csatorna konstrukciójától, a szórendszerrel stb.

A munkagáz hőmérsékletének növelésére megoldás is kínálkozik: megfelelően magas hőmérsékletre előmelegíteni az égéshez szükséges levegőt, oxigénnel dúsítani a levegőt, valamint kihasználni a magas hőmérsékleten lejátszódó termokémiai folyamatokat. Természetesen ezen módszerek kombi-

nációja adja a legmegfelelőbb hatást. Ha a levegő előmelegítőben a levegőt minimálisan 1800 K-ra sikerült felmelegíteni, mintegy 5–10 atm nyomáson, akkor az MHD csatornában elérhető az 1 atm nyomás és 3300 K hőmérséklet. Az előmelegítő után következő fontos építőeleme az MHD erőműveknek az égőkamra. Ebben játszódik le az üzemanyag elégetése és rendszerint itt adagolják a szóanyagot, amely megfelelően alacsony ionizációs potenciállal rendelkezvén biztosítja a munkagáz szükséges vezetőképességét. Az égőkamra alapvető funkciói közé tartozik ezek szerint a tüzelőanyag lehetőleg 100%-os elégetése, az egyensúlyi ionizáció beállítása és az MHD csatorna elején a homogén áramlás biztosítása. A leglényegesebb eleme az MHD erőművek természetesen a generátor csatorna. Ebben alakul át a munkagáz kinetikus és kémiai energiája elektromos energiává. Ennek a berendezésnek az elkészítésénél a legnagyobb problémát a tartós, jó hatásfokú struktúra kialakítása jelenti. Ezen belül részprobléma az elektródák és a szigetelőfalak anyagának megválasztása, az elektródák optimális eloszlása a csatorna mentén stb. Elektródának mind hűtött fém, mind meleg kerámiaanyag megfelel.

A szigetelőfalak problémája lényegében megoldottnak tekinthető. A legelterjedtebb a kerámia szigetelőkből álló szegmentált struktúra. További fontos alkotóelem a mágneses tér előállításához szükséges mágnes. Ez lehet hagyományos vasmagos mágnes, és lehet szupravezető mágnes is. Ez utóbbi sokkal gazdaságosabb, de ipari méretű kísérleti MHD egységekben még nem használnak nagyméretű szupravezető mágneseket.

Az általánosan használt szóanyag  $K_2CO_3$ , melyet vizes oldatban viznek be az égőkamrába. A szóanyag visszanyerésére szolgáló műveleteket az égéstermék lehűtése után hajtják végre. Már kidolgoztak a szóanyag visszanyerésére egy 98–99%-os hatásfokú technikát, az ún. csapadék technikát. A rendszerben venturi cső, ciklon, mosó, üledékszűrő található.

A Szovjetunió nyitottciklusú MHD berendezéseinek tervezése 1960–1961-ben kezdődött. Ebben az időszakban elméleti fizikai és gazdasági – műszaki felméréseket végeztek. 1964–65-ben elkészült az első kísérleti modell, az U-02 egység, amelyen a legalapvetőbb vizsgálatokat el tudták végezni. 1970–71-ben Kijevben is elkészült egy kísérleti MHD berendezés, amelynek azonban kisebb a jelentősége. Az U-02 tapasztalataira támaszkodva, 1971-ben elkészítették az U-25 kísérleti MHD erőművet, amelyet az első fázisban 3 ÷ 5 MW-os teljesítményre méreteztek. A jelenlegi legnagyobb teljesítményű MHD generátor az U-25 erőműben 7 MW-os volt, de a járulékos berendezések 5 MW teljesítményre készültek. A kutatómunka következő fázisában az U-25 egységet már a névleges 25 MW villamos teljesítményre tervezett új típusú szekcionált fém-kerámia elektródokkal ellátott külső vízűtésű csatornával kívánják üzemeltetni.

A Szovjetunió programjában az elkövetkezendő 15 ÷ 20 évre mindhárom alapvető MHD erőmű típus – a csúcsüzemű, félsúcsüzemű és alapüzemű –

1. táblázat

Az MHD erőmű típusa	Csúcsüzemű	Félcsőcsüzemű	Alapüzemű
Netto teljesítmény (MW)	400 ÷ 800	800 ÷ 1200	1000 ÷ 2000
Átlagos évi üzemidő (óra)	500 ÷ 1000	2500 ÷ 3500	5000
Tüzelőanyag megtakarítás a hagyományos típusra vonatkoztatva	azonos termikus hatások mellett pakurával cserélhető fel a speciális turbina üzemanyagok	25%	25%
Az MHD generátorhoz kapcsolható kiegészítő egység	forróvízkazán	gőzturbina	gőzturbina
MHD/gőzturbina villamos teljesítményarány	—	1 : 1	1 : 1
Mágneses típus	szupravezető gáz, pakura	mágneses rendszer gáz, pakura	gáz, pakura, szén
Tüzelőanyag	100%	50 ÷ 100%	50 ÷ 60%
Oxigéndúsítás (%)			

egyenlő súllyal szerepel. Az erre vonatkozó elképzeléseket az 1. táblázatban foglaljuk össze.

A műszaki ismeretek jelenlegi színvonalán a viszonylag rövidebb csatorna-élettartam igényeket támasztó csúcsüzemű erőművek tervezési munkálatai vannak a legelőrehaladottabb állapotban. Ezen változatnál a szakemberek már elvégezték a részletes rendszeranalízist, s lerögzítették egy 700 MW-os, manőverező csúcsüzemű generátor alapvető műszaki paramétereit, amelyet a 2. táblázatban foglalunk össze.

A félcsőcsüzemű erőműveknél végzett műszaki-gazdasági elemzés első stádiumában a szovjet szakemberek a 3. táblázatban összefoglalt fontosabb műszaki és gazdasági paramétereiket tekintik irányadónak.

2. táblázat

700 MW-os MHD csúcserőmű tervezett főbb paramétereit

Paraméter	Névleges érték
Tüzelőanyag-fogyasztás	440 kg/s
Oxigéntartalom az oxidáló közegben	50 súlyszázalék
Oxidálószer előmelegítés	800 K
MHD generátor teljesítmény	696 MW
A turbógenerátor teljesítménye	500 MW
Égőkammera hőmérséklet	3140 K
Égőkammera nyomás	13 atm
Gázhőmérséklet a csatorna kimenetén	2385 K
Nyomás a gőzfejlesztő kimeneténél	1,05 atm
Az oxidáló szer kompresszorának teljesítménye	101,2 MW

## 3. táblázat

1000 MW-os MHD félcsúcsüzemű tervezett műszaki és gazdasági jellemzői

Az erőmű kiadott teljesítménye	1000 MW
MHD generátor teljesítmény	750 MW
Turbina teljesítmény	413 MW
Az oxigénelőállító és kompresszor- rendszer teljesítménye	157 MW
Erőmű hatásfok	50%
Fajlagos beruházási költségek:	
Mágnes rendszer	16 Rb/kW
Inverter	6 Rb/kW
Oxigénelőállító- és kompresszor- rendszer	26 Rb/kW
Gőzturbina	32 Rb/kW
Tüzelőanyag adagoló, égéskamra, szóóanyag adagoló és visszanyerő rendszer, kémény	5 Rb/kW
Építkezési költségek	35 Rb/kW
Előre nem látható költségek	6 Rb/kW
Eredő fajlagos beruházási költség	126 Rb/kW

Intenzív munkálatok folynak az alapüzemű MHD erőművek tervezése és fejlesztése területén is. Itt első lépésben földgáz és fűtőolaj tüzelésű erőművek jelentik a fejlesztési munka alapvető célkitűzését, de nagy jelentőséget tulajdonítanak a szén felhasználásának is.

Az alapüzemű erőművek kivitelezésében ma még a fő problémát az U-25-nél már említett központi feladatok jelentik: a csatorna struktúrának hosszú élettartamúnak kell lennie — a gazdaságos üzemeltetéshez minimum 5000 óra élettartam szükséges —, ki kell fejleszteni a nagyméretű, legalább 5 T térerősséget biztosító szupravezető mágnest, meg kell oldani az oxigénelőállítás és dúsítás alapvető problémáit, nagy teljesítményű, hosszú élettartamú, szén elégetésére is alkalmas égőkamra rendszert kell kidolgozni stb.

A tervezési munkák a rendelkezésre álló információk szerint már előrehaladott állapotban vannak, számszerűen publikált adatok azonban nem állnak rendelkezésre.

Az *Egyesült Államokban* az MHD programot részben a szövetségi kormány, részben pedig a különböző villamosenergia-ipari cégek finanszírozzák évente kb. 10 ÷ 11 millió dolláros összbefektetéssel (1974-es adat). A jelenlegi elképzelések szerint 1985-re várják az olyan erőművek kifejlesztését, amelyek alapüzemben villamos energiát képesek termelni az országos hálózatba. A fejlesztési kutatási tervek szerint az MHD villamos energiatermeléssel kapcsolatos problémákat két lépcsőben kívánják megoldani: (1) az egyes erőműegységek kifejlesztése és kipróbálása (csatorna, égéskamra, szeparátor, előmelegítő, stb.); (2) a rendszertechnikai problémák tanulmányozása különböző szén felhasználása mellett. Az amerikai szakemberek — a szovjet tapasztalatokat

## 4. táblázat

## Nagyteljesítményű MHD alaperőművek tervezett jellemzői

		I.	II.
Levegő előmelegítési hőmérséklet	K	1370	1920
Égőkamra			
Nyomás	atm	5,5	14
Hőmérséklet	K	2670	2940
Hővesztesség	MW	46	25
MHD generátor			
Mágneses térerősség	T	6,0 ÷ 3,6	8,0 ÷ 4,5
Hall térerősség	kV/m	1,6 ÷ 2,9	1,2 ÷ 3,5
Kilépő gáz hőmérséklet	K	2230	2280
Kilépő gáznyomás	atm	1,15	1,15
Csatornahossz	m	18	16
Csatorna belépőnyílás keresztmetszete	m <sup>2</sup>	1,8	0,8
Csatorna kilépőnyílás keresztmetszete	m <sup>2</sup>	7,5	7,5
Izoentropikus hatásfok	%	75	74,5
Teljesítménymérleg			
MHD teljesítmény	MW	590	990
Gőzturbina-teljesítmény	MW	610	462
Összteljesítmény	MW	1200	1452
Kompresszor-teljesítmény	MW	157	220
Járulékos egységek, inverter vesztességek	MW	42	38
Összvesztesség	MW	199	258
Erőmű kiadott teljesítmény	MW	1001	1194
Eredő hatásfok	%	50	59,7

is felhasználva — ugyancsak arra a következtetésre jutottak, hogy az 1000 MW villamos teljesítményű erőműegységek létrehozása a legcélszerűbb és leggazdaságosabb. A 4. táblázatban az AERL szakemberei által kidolgozott ilyen elképzelést mutatunk be, két változatban, amelyek abban térnek el egymástól, hogy az I. változat 1100 ÷ 1400 K, a II. változat pedig 1600 ÷ 1900 K levegő előmelegítési hőmérsékletet tételez fel.

A táblázat szerinti I. és II. esetre vonatkoztatott gazdasági számítások itt azt mutatják, hogy a hagyományos, széntüzelésű, 590 K-ra előmelegített levegővel és 40%-os hatásfokkal működő erőműveknél adódó \$/kW fajlagos beépítési költség már az I. változatnál is elérhető (210 \$/kW), míg a véglegesnek tekintett II. változat már költségbefektetés szempontjából is gazdaságosabbnak ígérkezik (150 \$/kW)

*Nemzetközi MHD-együtműködés és távlatai*

Az elmúlt években a növekvő villamos energiafelhasználással párhuzamosan jelentős mértékben megnőtt az egész világon a gazdaságosabb villamos energia előállítás módjai iránti érdeklődés. A szocialista országokban ez

magától értetődő következménye a tervszerű energiagazdálkodásnak, a fejlett tőkés országokat pedig az ún. energiakrízis készítette az energiataralékok gazdaságosabb kihasználására irányuló kutatási és fejlesztési munkák felgyorsítására.

Ennek a folyamatnak eredményeképpen jött létre az MHD-villamos energiaátalakítás területén vezető szerepet játszó két ország, a Szovjetunió és az Egyesült Államok közötti együttműködés.

A kormányközi megállapodást követően a Szovjetunió és az Egyesült Államok szakértői a következő munkaprogramban állapodtak meg:

amerikai gyártmányú elektróda és szigetelő anyagok tartóssági vizsgálatai a szovjet U-02 kísérleti MHD-egységen;

— az amerikai fél szupravezető mágnest és csatornát dolgoz ki az ipari méretű erőműveket modellező U-25-ös egységhez, s közösen hasznosítják a kísérleti tapasztalatokat;

— kölcsönös tájékoztatás és diszkusszió az MHD-erőművek rendszer-technikai, tervezési és konstrukciós kérdéseiről.

Jelentős együttműködési munkák folynak még a Szovjetunió és Lengyelország között a széntüzelésű, s a szén elgázosításán alapuló rendszerek, a levegő előmelegítő egységek, valamint a szóanyag visszanyerés területén.

A korábbi években együttműködés folyt a szovjet és francia intézetek között, amely ma már azonban csak a mérés-technika területére, elsősorban a lézeres diagnosztikai vizsgálatokra vonatkozik.

Növekvő érdeklődést tanúsít India a Szovjetunióval való együttműködés iránt. A közösen kialakított együttműködések szerint tervezik egy U-02 típusú kísérleti rendszer felállítását Indiában.

Az U-25-ös egység korábbiakban ismerttetett sikeres üzemeltetési tapasztalatai következtében a nyugat-európai erőmű gyártó cégek is fokozott érdeklődést mutatnak az MHD együttműködés iránt, ami elsősorban az MHD erőműépítésben rejlő üzleti lehetőségek felismerésével magyarázható.

Külön ki kell emelni a Szovjetunió és a többi KGST országok közötti együttműködésben rejlő, komoly ipari potenciállal alátámasztott lehetőségeket, amelyek egyrészt a részegységekkel kapcsolatos speciális konstrukciós megoldások kidolgozásában, a mérés-technikai rendszerek megteremtésében, másrészt az MHD erőművek sorozatgyártásához szükséges ipari kapacitás létrehozásában rejlenek. A részletes munkaprogram kidolgozása jelenleg már folyik a KGST megfelelő szervezeteiben, egységes, sokoldalú rendszerbe foglalva az idáig folyó vagy most kialakuló kétoldalú együttműködési munkákat.

Itt látjuk célszerűnek körvonalazni Magyarország szerepét és helyét az MHD-villamos energiaátalakítással kapcsolatos rendkívül szerteágazó nemzetközi kutatási tevékenység területén.

Az első gyakorlati MHD csatornára vonatkozó, Karlowitz B. és Halász D. által benyújtott magyar szabadalom, valamint az energetika és a kisülés-



fizika területén folyó kutatások hagyományai alapján Magyarország a korábbi években ezen a területen elsősorban elméleti jellegű munkákat folytatott. Fordulópontot jelentett az MTA és az OMFB által kezdeményezett, kísérleti bázissal is rendelkező MHD-diagnosztikai munkák megindítása, majd 1973-ban a Szovjetunióval való kétoldalú együttműködés létrehozása.

A szovjet szakemberekkel történt diskussziók alapján a VKI laboratóriumaiban intenzív munka indult meg olyan plazmadiagnosztikai mérési módszerek kidolgozására, amelyek segítségével folyamatosan nyomon követhetők az MHD plazmában lejátszódó folyamatok. Az idáig elért eredmények röviden a következőkben foglalhatók össze:

1. Elkészült és kipróbált nyert egy modell plazmacsatorna, amely alkalmas az áramló plazma holografikus interferometriai vizsgálatára. A plazmaképző gáz argon-nitrogén keverék, amelyet plazmapisztollyal hevítenek fel  $1000 \div 3000$  K-ra. A plazmasugár átmérője 80 mm. A csatorna biztonságos üzemeltetéséhez sor került egy gázszabályozó és biztonsági egység elkészítésére, amely a plazmapisztoly üzemi paramétereit szabályozza és védelmet nyújt a meghibásodások okozta tönkremenetel ellen is. A csatorna stacionaritásának mérésére egy hőmérsékletmérő egység szolgál. Ezzel 24 pontban követhető a csatorna belsejének és falának hőmérséklete. A hőmérsékleti hitelesítés biztosítására a dinamikus termoszonddákkal való mérési módszer szolgál, amelynek elmélete itt némileg módosított formában alkalmazható.

2. Elméleti előkészítő munkák folynak a hologramok kiértékelésére vonatkozóan. Az eddigi eredmények alapján várható, hogy az MHD plazmák holografikus vizsgálata kvantitatíve is lehetséges lesz. A mérések során megállapítást nyertek a jelenlegi körülmények között fennálló optimális felvételi technika feltételei.

Jelenleg transzparens tárgyak holografikus interferometriájára vonatkozó kutatások folynak modellanyagokon – kis teljesítményű MOM gyártmányú HeNe lézerrel. A kutatások végcélja olyan felvételi és rekonstrukciós technika kidolgozása, amely lehetővé teszi a transzparens közegek törésmutatójának térbeli meghatározását inverzió alkalmazása nélkül.

Összegzésként megállapítható, hogy a mágneses hidrodinamikai úton történő energiaátalakítással kapcsolatos kutatási és fejlesztési munkák az elmúlt években jelentős mértékben felgyorsultak, mondhatni minőségi változáson mentek keresztül. Amíg a 60-as években az alapvető problémát az elméleti kérdések tisztázása és a kutatási főirányok meghatározása jelentette, addig ma már az elsődleges hangsúly a komplex, 1000 MW nagyságrendű villamos energiát előállító erőművek részegységeinek kifejlesztésén és a rendszertechnikai kérdések megoldásán van, s ez a vezető MHD-szakértők véleménye szerint 1980–85 között ölthet konkrét formát ipari erőmű képében.

## Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki SZENDY Károly akadémiai lev. tagnak és BITÓ Jánosnak a műsz. tudományok doktorának a tanulmány összeállítására nyújtott sokoldalú segítségükért, valamint az értékes diszkuszióikért.

## IRODALOM

1. BITÓ—SZENDY: Az MHD generátorokkal kapcsolatos kutatások főbb irányvonalai. *Műszaki Tudomány* 46 (1973)
2. ANTAL—BOLLA: *Acta Techn. Hung.* 73 (1972)
3. TANOS—ANTAL—BOLLA: Előtanulmány az „MHD plazma vizsgálatára szolgáló diagnosztikai módszerek és mérőkészülékek kutatása” témáról. VKI jelentés, 1973
4. MHD plazma vizsgálatára szolgáló diagnosztikai módszerek és mérőkészülékek kutatása. VKI jelentés 1—2, 1974
5. KIRILLIN—SCHEINDLIN: Research and Development in the Field of MHD-Conversion of Energy. *World Energy Conference* (1974)
6. Pervüj szovjetszko-amerikanszkij szimpozium po MGD. Moszkva 1974
7. PILINYI—TANOS—ANTAL—BOLLA: Útjelentés az IVTAN-beli tanulmányútról. Moszkva 1974
8. HAINES—MCNAB: Magnetohydrodynamic Power of Dynamics. Physics in Technology, 1974, USA
9. Beszámoló az MHD kutatásokról az Energetikai Szakbizottság ülésén, 1975
10. BOLLA: Útjelentés az 1975. február 5-i, moszkvai KGST MHD szakértői ülésről
11. ANTAL—BOLLA: Lézerholografikus plazmavizsgálatok, 1974
12. PILINYI A.: Holografikus plazmavizsgálatok. OPIAF előadás, 1975

**MHD-Generator Research and Related Hungarian Plasmadiagnostical Investigations.** — This situation report deals with one prospective branch of direct electrical energy production, the open-cycle working-gas MHD generation in high power (1000 MW and more) utility plants. The paper is neither concerned with research on closed-cycle working-gas operation, which can generally be combined with atom reactors, nor with liquid working medium MHD generators. It reviews the most important results attained by Soviet and American experimental MHD installations, the applied diagnostic methods, the situation of international cooperation and within this frame the Hungarian-Soviet MHD cooperation.

**MHD-Generatorforschung und die daran anschließenden ungarischen plasmadiagnostischen Untersuchungen.** — Dieser Situationsbericht beschäftigt sich mit einem aussichtsreichen Zweig der Elektroenergieerzeugung, derjenigen mittels offenem MHD-Zyklus mit Arbeitsgas in großen gemeinnützigen Kraftwerken (von 1000 MW und darüber). Die Arbeit berichtet weder über die Forschungsarbeit betreffend MHD-Generatoren mit geschlossenem Arbeitsgaszyklus, deren Betrieb im allgemeinen mit Atomreaktoren abgestimmt werden kann, noch über MHD-Generatoren mit flüssigem Medium. Es wird ein Überblick über die in den bedeutendsten sowjetischen und amerikanischen MHD-Versuchseinrichtungen erzielten wichtigsten Ergebnisse, die angewendeten diagnostischen Verfahren, die Lage der internationalen Zusammenarbeit — und in deren Rahmen die ungarisch—sowjetische Zusammenarbeit — geboten.