

## ПОБУДОВА, МЕТОДИ І ТЕХНІКА ДОСЛІДЖЕНЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЇ ПРИ НАДВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

**М.І.Фальковський**, канд.техн.наук, **О.В.Примак**

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

e-mail: [lerdep7@ukr.net](mailto:lerdep7@ukr.net)

*Розглянуто особливості побудови, роботи та досліджень одного з видів високотемпературної електричної ізоляції з робочою температурою до 2000 °С. Дослідження проведено на діючому МГД генераторі та за допомогою спеціально розроблених модельного вузла ізоляції і пристрою для безперервного вимірювання та запису опорів і електричної міцності ізоляції. Досліджено величини опору електричної ізоляції електродів відносно заземленого корпусу каналу та опору міжелектродної ізоляції в процесі зміни режимів роботи МГДГ. Встановлено, що опір міжелектродної ізоляції визначається її поверхневим опором. Його величина залежить від виду газової атмосфери в каналі: окислююча підвищує поверхневий опір, відновлююча його знижує. При температурах, вищих за ~ 1300 °С, поверхневий опір починає більше визначатися властивостями матеріалу діелектрика. Бібл. 12, рис. 6.*

**Ключові слова:** електрична ізоляція, високі температури, МГД генератор.

У промисловій електротехніці найвищою робочою температурою електроізоляції є температура 300–400 °С. Однак розвиток науково-технічних досягнень кінця минулого століття призвів до необхідності мати можливість ізолювати електричні напруги, навіть високовольні, при температурах 1500–2000 °С і більших. Як відомо, це пов'язано зі створенням інженерних пристроїв термоядерної енергетики, космічної і спецтехніки, термоємисійних перетворювачів енергії (ТЕП'ів), магнітогідродинамічних генераторів (МГДГ) електричної енергії, плазмових та електронно-іонних технологій тощо. Серед вказаного найбільш довершеною електричною машиною був МГД генератор. Хоча інтенсивні роботи зі створення МГД генераторів були припинені, дослідження і розробки, виконані при вирішенні цієї проблеми, мають загальнотехнічне значення. Зокрема залишається інтерес до результатів досліджень рівня експлуатаційних можливостей електроізоляції і діелектричних матеріалів при вказаних високих температурах, які були недостатньо представлені як в загальних публікаціях, так і в заключній узагальнюючій роботі з проблеми МГД перетворення енергії [3]. Між тим, потреба в таких знаннях залишається актуальною, оскільки роботи з проблеми створення МГД генераторів не припиняються. Так, наприклад, великомасштабна МГД установка з використанням сонячної енергії, що розроблена в політехнічному інституті Rensselaer (США), призначена до випробувань у другій половині 2013 року [1,10]. Більш того, такі знання необхідні не тільки у вказаних областях інженерних проблем, а й у більш "прозаїчних", наприклад, при розробці запальних пристроїв для камер згоряння різного призначення [9,12]. У таких пристроях діелектрик між електродними рядними електродами є не тільки ізолятором, а й засобом формування на ньому запального розряду і працює після запалення в умовах контакту з високотемпературними продуктами згоряння [9,12], тобто в умовах майже таких, як і у каналі МГДГ.

У даній публікації подаються узагальнюючі результати досліджень роботи електричної ізоляції в високотемпературних умовах МГД установок Інституту електродинаміки НАН України [8], що з певних причин залишились недостатньо висвітленими в технічній літературі, але не втратили наукового і технічного значення.

**Експериментальні умови і конструктивні особливості ізоляції.** Характер сумісної дії високих температур і електричних напруг на електричну і теплову ізоляцію показаний на схематичному зображенні перерізу каналу МГДГ, перпендикулярному до його електродних (бокових) стінок, рис. 1. У каналі діють дві взаємно перпендикулярні напруги. В потоці плазми, що рухається зі швидкістю  $u$  в магнітному полі з індукцією  $B$ , перпендикулярному до міжелектродних стінок каналу, генерується електрорушійна сила (ЕРС)  $E_{\phi}$ , яка умовно названа фарадеевською.

При замиканні протилежних електродів 1-1', ..., n-n' на електричне навантаження, між ними поперек каналу (вісь  $y$ ) протікає робочий струм і падає фарадеевська напруга  $U_{\phi}=(1-k)uBl_y$ , при  $k =$

$=j_r \rho / uB$ , де  $k$  – коефіцієнт поперечного електричного навантаження,  $l_y$  – ширина каналу (відстань) між

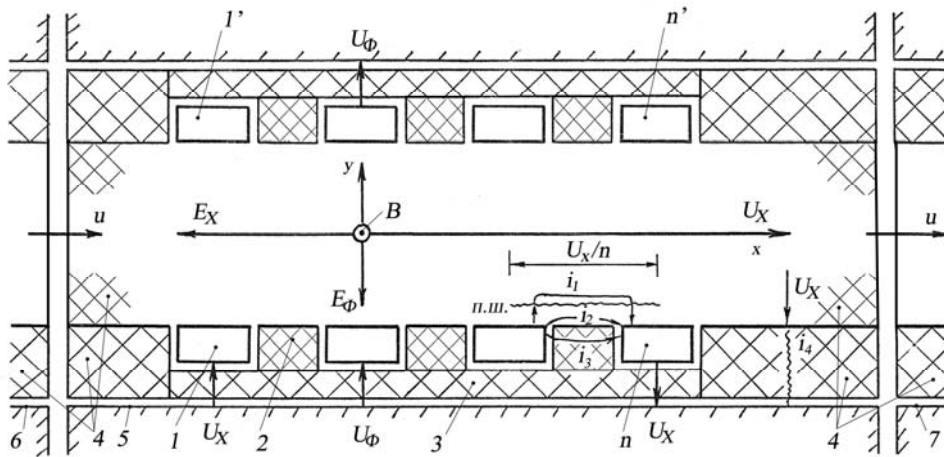


Рис. 1

електродами,  $j_r$  – струм генератора,  $\rho$  – питомий опір плазми.

При взаємодії фарадесвських робочих струмів з магнітним полем вздовж каналу генерується ЕРС Холла  $E_X$ . Відповідно між першою та останньою парами електродів вздовж потоку (вздовж вісі каналу  $x$ ) діятиме холловська напруга  $U_X = \beta_e k u B l_x$ , де  $\beta_e$  – параметр Холла,  $l_x$  – довжина електродної частини каналу вздовж вісі

$x$ , на якій формується  $U_X$ . Таким чином, як і у будь-якій електричній машині, в МГДГ потрібно забезпечити поздовжню і поперечну електричні ізоляції. Поздовжня ізоляція в даному випадку – це внутрішня поверхня теплової ізоляції стінок каналу 4 і міжелектродної електроізоляції 2, рис. 1. Поперечна електроізоляція – тепла ізоляція стінок каналу 4, а також ізоляція електродів 3, на які діють  $U_X$  і  $U_\Phi$  відносно водозаохолоджуваних зовнішніх металевих стінок каналу 5 (показано стрілками  $U_X$ ,  $U_\Phi$ ). Ці напруги, особливо  $U_X$ , замикаються частково і на камеру згоряння 6 і плазмовідвідні секції 7 за каналом, створюючи втратні струми витікання. Особливість роботи поздовжньої ізоляції в цих умовах полягає у тому, що вона зазнає сумісної дії високої напруги  $U_X$  і високої температури потоку плазми ( $\sim 3000$  °С). Поперечна – зазнає сумісної дії високої напруги і великих градієнтів температури (100–300° С/мм). Практичні дослідження МГДГ у світі показали, що навіть при таких жорстких умовах роботи ізоляції вдалося досягти холловських напруг  $U_X$  величиною до кількох кіловольт, що підтверджує подальший інтерес до досліджень та розробок надвисокотемпературної ізоляції.

Як видно з викладеного, найвразливішим місцем у системі ізоляції (рис. 1) є проміжок між сусідніми електродами вздовж потоку. Під дією холловської напруги  $U_X/n$  розряд тут може розвиватись у трьох напрямках. Перший – від електрода через пристінний шар (ПШ) на плазму і далі з плазми на сусідній електрод ( $i_1$ , рис. 1). Другий, не менш вірогідний варіант, – розвиток розряду на поверхні діелектрика в результаті теплової нестійкості при дії струму витікання  $i_2$  на поверхню ізоляції. Як показали дослідження [6, 7], в умовах значних теплових полів (на відміну від кімнатних температур) пробій між електродами можливий і по об'єму ( $i_3$ ), хоч паралельно об'єму є відкрита поверхня, електрична міцність якої при кімнатних температурах завжди менша і пробій ізоляції проходив би саме по ній. Таким чином, в умовах дії надвисоких теплових полів крім абсолютних значень величин пробивних напруг потрібно досліджувати ще й шляхи розвитку пробію, які не є однозначними і аналогічними таким при нормальних температурах.

Випробування електричної міцності ізоляційних конструкцій є руйнівним і потребує виготовлення після випробувань все нових і нових та дорогих макетів. Через це параметром, який дає можливість характеризувати міцність, але дешевший і більш доступний для досліджень, є об'ємний та поверхневий опір діелектриків. Немає сумнівів, що в описаних умовах дії надвисоких температур мало-ймовірні електричні пробію ізоляції і практично завжди пробію будуть електротепловими (теплова нестійкість при дії струмів витікання). Згідно з теорією теплового пробію головним фактором, що визначає пробивну напругу  $U_{np}$ , є питомий опір  $\rho$  діелектрика [5]

$$U_{np} = \sqrt{(33,6/a)k\rho} \cdot e^{-aT/2} \varphi(c),$$

де  $k$  – теплопровідність діелектрика,  $a$  – коефіцієнт експоненти, за якою змінюється питомий опір діелектрика при зростанні його температури  $T$ ,  $\varphi(c)$  – функція геометричних розмірів зразка і тепловідводу від нього в оточуюче середовище.

Таким чином, головними завданнями вивчення поведінки електричної ізоляції при надвисоких температурах було одержання величин опорів ізоляції в контрольованих умовах не тільки як самостійних характеристик її якості відносно струмів витікання, а ще й як якісних характеристик її електричної міцності, а також одержання безпосередніх величин електричної міцності і напрямків розвитку електричних розрядів в контрольованих умовах.

**Методи і схеми вимірювань.** Оскільки найбільш вразливою була поверхня міжелектродної ізоляції 2 (рис. 1), то основні зусилля були спрямовані саме на її дослідження. Вимірювання опору між електродами проводилось за схемою рис. 2. Опір  $R_e$  вибраного електрода  $E_n$  вимірювався відносно електрично з'єднаних між собою двох сусідніх  $E_{n-1}$  і  $E_{n+1}$ , які виконували роль другого вимірювального електрода і охоронного кільця від неконтрольованого розтікання струму витіку з електрода  $E_n$  при подачі на нього вимірювальної напруги. Міжелектродний опір  $R_{me}$  при цьому обраховувався як  $R_{me}=2R_e$ . Враховуючи те, що при вимірюваннях на постійній напрузі нагріті діелектрики поляризуються з великою

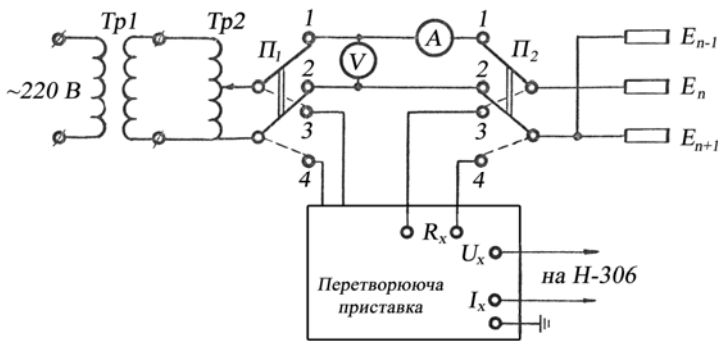


Рис. 2

кою постійною часу [5], вимірювання проводилися на змінному струмі 50 Гц методом вольтметра-амперметра з використанням джерела значної потужності  $Tr1$ ,  $Tr2$  (рис. 2). Це пов'язано з тим, що на об'єкті крім струмів і напруг самого МГДГ є ще багато інших великопотужних ланцюгів допоміжних робочих засобів та довгих комунікаційних кабелів, електромагнітні наведення від яких призводять до ненадійності вимірювань малострумовою технікою. При стаціонарних у часі режимах роботи, зокрема і при кімнатних температурах, вимірювання за допомогою вольтметра і амперметра можна було проводити вручну. При швидкозмінних процесах вимірювання виконувались за допомогою спеціально розробленого перетворюючого пристрою (рис. 2). При цьому змінна напруга на вимірюваний опір подавалась через пристрій (при переведенні перемикачів  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$  у положення 3–4), а значення напруги і струму на опорі на змінній напрузі перетворювались в пристрої у значення на постійній напрузі і подавались на планшетний самозаписувач постійного струму Н306. Вимірювані величини опорів при обох видах струмів із значеннями більшими, ніж 10 кОм, вже практично не відрізнялись. Випробування на електричну міцність міжелектродної ізоляції також проводилось через перетворюючий пристрій з записом вольт-амперних характеристик розвитку пробою на приладі Н306. Пробою можна було проводити як на змінній, так і на постійній напругах.

У процесі досліджень МГДГ було використано в основному два варіанти конструкції каналу. У першому варіанті електроди 1 і міжелектродна ізоляція 2 (рис. 1) представляли собою окремі водозаохолоджувані блоки, відповідно ізольовані від зовнішнього металевого корпусу каналу [4]. При цьому електроди були виготовлені з електропровідної керамічної мозаїки, напаяної на мідний водозаохолоджуваний елемент, а міжелектродний ізоляційний блок – такий самий елемент тільки з наклеєною керамічною мозаїкою на основі оксиду магнію  $MgO$ . Такий канал був призначений для загального випробування можливостей його роботи і відпрацювання елементів конструкції у високотемпературних умовах. Проте саме у цьому каналі було проведено дослідження рівнів поперечної ізоляції МГДГ, результати якого викладені нижче. Другий, головний, варіант каналу був прототипом реального генератора електричної енергії. Електрод 1 (рис. 1) представляв собою мідний водозаохолоджуваний елемент з характерними розмірами: ширина вздовж каналу 26 мм і довжина по висоті каналу 100 мм. Поверхня, звернена до середини каналу, мала стільникову будову, заповнену електропровідною керамікою. Як ізоляція 2 між електродами клеювались плитки з кераміки спеціальної розробки (також на основі  $MgO$ ) з характерною товщиною вздовж каналу 5–6,5 мм. При такій конструкції пробій і вимірювання опору виконуються між порівняно холодними електродами, оскільки вони мідні і охолоджуються водою. У зв'язку з цим, на результати міг впливати хоч і вузький, але заохолоджений перехідний шар метал-кераміка і можливі градієнти температури в кераміці. Для усунення впливу цих факторів і щоб дані з поверхневого опору і поверхневої електричної міцності відповідали температурі поверхні, був розроблений модельний пристрій ізоляції

(вставка), в якому забезпечувалась рівність температур поверхні ізолятора, що досліджувався, і електродів (рис. 3). У пристрої досліджуваний ізолятор 4 має циліндричну форму, оточений циліндричним зовнішнім заземленим електродом 2 і всередині містить циліндричний стрижневий потенціальний електрод 3. Завдяки цьому також забезпечується захист результатів від спотворень струмами витікання, оскільки зразок кераміки 4, що досліджується, оточений зовнішнім циліндричним охоронним електродом 2. Електроди виконано з кераміки на основі оксиду цирконію  $ZrO_2$ , яка при високій температурі стає високоелектропровідною. Зразки ізоляції 4 виготовлялись з того ж матеріалу на основі оксиду магнію  $MgO$ , що й керамічні модулі ізоляції стінок каналу 1. В електродах монтувалися платинородієві Pt-PtRh10 термопари 7, які одночасно виконували функцію вимірювальних струмопідводів до електродів. Вся електродно-ізоляційна частина наклеювалась спеціальним керамічним клеєм на водозахолоджувану підставку 6 і весь пристрій монтувався у водозахолоджуваній стінці 5 каналу МГДГ або стенді для окремих фізико-технічних досліджень так, щоб поверхня керамічного зразка з електродами була на одному рівні з основною ізоляцією 1 стінки каналу 5.

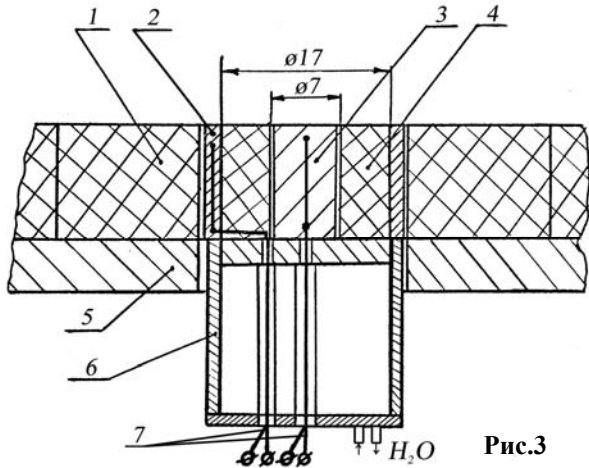


Рис.3

Температура стінки вимірювалася пірметром яскравості ЛОП-72, фотоелектричним пірметром ФЕП-4М і термопарами (переважно платинородієвими Pt-PtRh10). Було проведено спеціальні дослідження впливу товщі потоків продуктів згоряння та плазми на результати вимірювання, вплив скла вікон для спостережень, а також змін результатів у залежності від того, на закритій в каналі чи відкритій поверхні ведеться спостереження тощо. Відповідні поправки вносились у величину вимірюваної температури яскравості.

**Результати досліджень та обговорення.** Дослідження рівня опору електричної ізоляції електродів відносно заземленого металевого корпусу  $R_{ек}$  ("поперечна" ізоляція) проводилося у процесі зміни температурного і атмосферного режимів в каналі за першим варіантом конструкції. При цьому окремо вимірювався опір ізоляції  $R_{ек}$  кожного із трьох різних електродів, рис. 2. Атмосферні режими в каналі: продукти згоряння природного газу в повітрі (газоповітряний режим) або в повітрі з добавкою кисню (кисневий режим) при коефіцієнті надлишку окислювача  $\alpha < 1$  (тобто збагачена природним газом суміш, коли окислювача (кисню) менше, ніж потрібно для повного згоряння палива) та при  $\alpha > 1$  (збіднена суміш, коли в продуктах горіння створюється надлишок кисню для надійності повного згоряння палива і підвищення температури потоку). Третій режим – плазмовий (робочий), коли в продукти згоряння для створення плазми додається присадка, що легко іонізується (розчин солі калію  $K_2CO_3$  або луку  $KOH$ ).

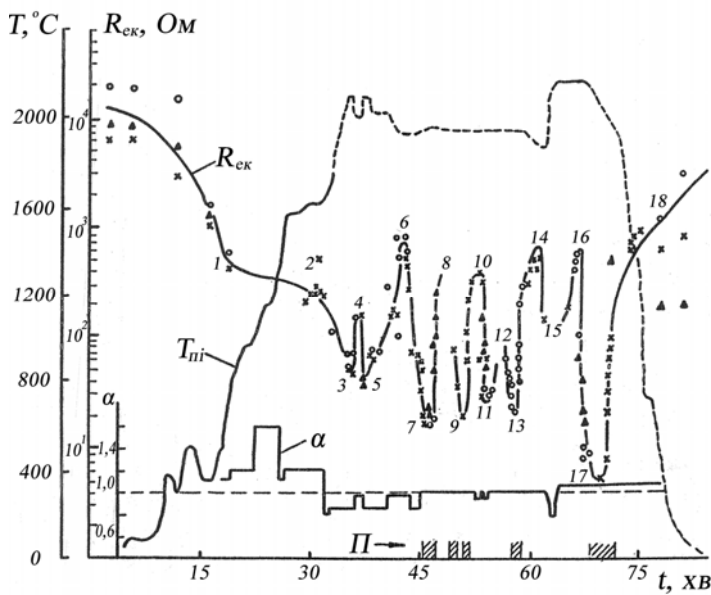


Рис. 4

Значення опору ізоляції всіх трьох електродів  $R_{ек}$  у процесі роботи МГДГ зі зміною режимів атмосфери каналу у часі  $t$  показані на рис. 4 (позначені різними точками) і осереднені кривою  $R_{ек}(t)$ . Цифрами на кривій відзначені режимні точки роботи МГДГ. Кривою  $T_{ни}(t)$  представлено зміни температури на поверхні ізоляції  $T_{ни}$ . Крива  $\alpha(t)$  – зміни коефіцієнта надлишку кисню  $\alpha$  в продуктах згоряння. Літера «П» вказує на інтервали часу  $t$  (заштриховані), протягом яких в струмінь продуктів згоряння в каналі подавалась добавка (присадка), що легко іонізується, тобто в цей час в каналі МГДГ був потік робочої плазми. Як видно з кривої  $R_{ек}(t)$ , з

початком роботи МГД генератора опір ізоляції електродів на заземлений корпус каналу різко зменшується на 1,5 – 2 порядки до точки 1 на кривій. Це падіння опору ізоляції починається з вмикання і роботою запального пристрою в камері згоряння, яке призводить до початкового підвищення температури поверхні ізоляційної стінки в каналі  $T_{\text{пі}}$  до рівня  $\sim 400$  °С.

Крім того, продукти згоряння при цьому відповідають спалюванню збагаченої суміші, що призводить до суттєво відновлювальної атмосфери в каналі, навіть з елементами сажистих утворень. Від точки 1, яка відповідає початку кисневого режиму горіння в камері згоряння, спад опору ізоляції  $R_{\text{ек}}$  суттєво уповільнюється, зменшуючись до точки 2 всього в 3 рази, хоч температура  $T_{\text{пі}}$  при цьому суттєво зростала, збільшившись у 4 рази.

Проте, як видно з кривої  $\alpha=f(t)$ , в цей час в каналі в продуктах згоряння вже був надлишок кисню ( $\alpha>1$ ), тобто в каналі була окислювальна атмосфера. Подальше зниження опору від точки 2 до точки 3 пов'язано не тільки з продовженням зростання температури поверхні кераміки  $T_{\text{пі}}$ , а й з падінням коефіцієнта надлишку окислювача  $\alpha$  до значень 0,8–0,86, що створювало відновлювальну атмосферу в каналі. Контрольне підвищення  $\alpha$  до значення 0,98 (точка 4) призводить до підвищення  $R_{\text{ек}}$ , незважаючи на збереження найвищого рівня температури  $T_{\text{пі}}$ . Така ж закономірність зберігалася і при подальших змінах коефіцієнта  $\alpha$ . Порівняння значень  $R_{\text{ек}}$  в точках 1, 2, 6, 10, 14, 16 показує, що стабільно високий рівень температури поверхні кераміки в каналі при збереженні  $\alpha>1$  не призводить до подальшого суттєвого падіння опору ізоляції електродів  $R_{\text{ек}}$ , який знаходиться на рівні  $(0,8-1) \cdot 10^3$  Ом. Навпаки, робота при  $\alpha<1$  супроводжується падінням  $R_{\text{ек}}$  на порядок і більше до величин 20–40 Ом (точки 3, 5, 11, 15). Характерно, що це падіння співрозмірне з тим, яке виникає при введенні в продукти згоряння присадки, що легко іонізується (точки 7, 9, 13, 17), коли починається шунтування ізоляції електродів високопровідною плазмою. Закінчення роботи МГДГ зі зниженням температури і з переходом до гарячеповітряної атмосфери в каналі (заклучне продування каналу) призводить до відновлення початкового висхідного рівня опору ізоляції електродів  $R_{\text{ек}}$ , точка 18.

Дослідження опору міжелектродної ізоляції  $R_{\text{ме}}$  за схемою рис. 2 в каналі другої конструкції показало, що початкові рівні  $R_{\text{ме}}$  після висушування каналів складали  $10^4-10^5$  Ом (рис. 5). На рис. 5 показано зміни опору міжелектродної ізоляції  $R_{\text{ме}}$  у порівнянні зі змінами розрахункової температури продуктів згоряння (газової атмосфери)  $T_{\text{г}}$  в каналі в одному із запусків МГДГ (практика роботи показала, що  $T_{\text{пі}}$  в першому наближенні менша від  $T_{\text{г}}$  на  $500\pm 200$  °С в залежності від загального рівня температури в центрі каналу, при цьому, чим більша  $T_{\text{г}}$ , тим більший перепад  $T_{\text{г}}-T_{\text{пі}}$ ). Вказано також зміни режимів у каналі. Перед запуском у роботу каналу МГДГ волога ізоляція, особливо клейові з'єднання, досушувалася гарячим повітрям із компресора. При цьому подача води в охолоджувальну систему, на відміну від ситуації в першій конструкції каналу, не знижувала міжелектродного опору ізоляції  $R_{\text{ме}}$ , а в 2–3 рази збільшувала його (рис. 5), що пов'язано з охолодженням нагрітої перед тим ізоляції. Це побічно підтверджує згадані вище передбачення можливої недостатньо точної відповідності вимірюваних значень  $R_{\text{ме}}$  температурі поверхні ізоляції  $T_{\text{пі}}$  за схемою рис. 2 через близькість заохолоджених корпусів електродів 1...n до міжелектродних ізоляційних вставок 2, рис. 1.

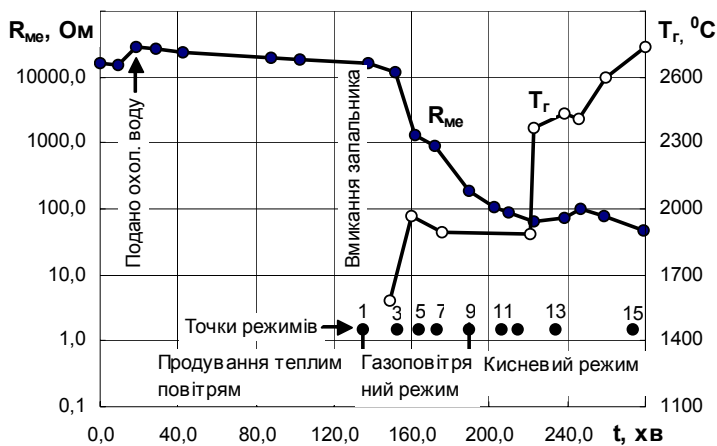


Рис. 5

Звертає на себе увагу близькість величин  $R_{\text{ек}}$  і  $R_{\text{ме}}$  у нагрітому стані, хоч варто було очікувати, що  $R_{\text{ек}}$  має бути набагато більшим від  $R_{\text{ме}}$ . Це обумовлено тим, що опір поверхні ізоляції найнижчий і вимірювальний струм при вимірюванні  $R_{\text{ек}}$  розтікається по всій внутрішній поверхні ізоляції каналу 4 (рис. 1) і замикається навіть на заземлені камеру згоряння 6 та секції відводу плазми 7 за каналом МГДГ, тобто опір електрода на корпус шунтується опором всієї внутрішньої поверхні каналу.



Найбільш суттєвою особливістю у змінах опору міжелектродної ізоляції  $R_{ме}$  є така сама, як спостерігалася і в змінах  $R_{ек}$ , а саме:  $R_{ме}$  швидко зменшується на 1,5–2,5 порядки при вмиканні запальника і протягом газоповітряного режиму, досягаючи практично мінімальних значень у запуску, що знаходяться на рівні  $10^3$ – $10^2$  Ом (рис. 5). Заслугує особливої уваги те, що подальше значне зростання температури поверхні ізоляції  $T_{пi}$  від 900 навіть аж до 1900 °С мало зменшує значення  $R_{ме}$ , всього в межах  $\sim 0,5$  порядку, а в окремих випадках і менше. Це видно на рис. 5 відповідно при  $T_r \sim (1850\text{--}2700)$  °С. Більш плавно відповідно температурі поверхні ізоляції  $T_{пi}$  відбувалася зміна опору ізоляції вставки  $R_{вст}$ , рис. 6. Опір  $R_{вст}$  – опір дослідного зразка ізоляції 4 між електродами 3 і 2, рис. 3. Мінімальні значення  $R_{вст}$  навіть при максимальних температурах виявились на порядок вищими, ніж значення міжелектродної ізоляції  $R_{ме}$  у каналі МГДГ, рис. 5, 6. Ці результати більш об'єктивно характеризують властивості ізоляції при високих температурах, оскільки, як вказувалось, температура поверхонь дослідного зразка ізоляції і електродів однакова та відсутні умови для витікання вимірювальних струмів, рис. 3, на відміну від схеми вимірювання міжелектродної ізоляції  $R_{ме}$  у каналі, рис. 2, при якій вимірювальний струм з електрода  $E_n$  недостатньо екранується електродами  $E_{n-1}$  та  $E_{n+1}$ . Крім того, на пониження вимірюваного опору  $R_{ме}$  впливають шари керамічного клею з порівняно електропровідними сполуками Na, K між керамічною проставкою 2, рис. 1, і сусідніми електродами  $1\dots n$ , та, головне, на торцях цих елементів на клейовому стикі їх з верхньою і нижньою стінками каналу. Це, зокрема, також підтвердило доцільність використання вставки для високотемпературних досліджень.

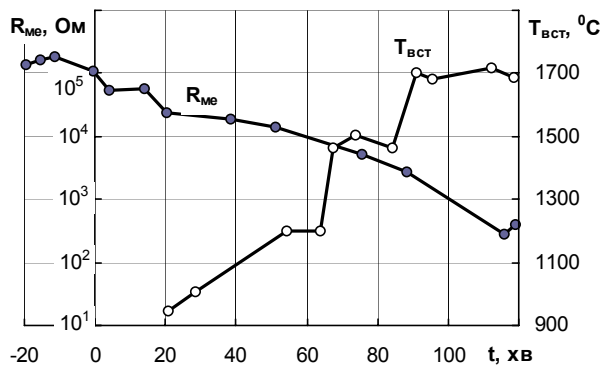


Рис. 6

З одержаних даних видно, що при односторонній дії високих температур на ізоляцію, її електричні властивості визначаються практично виключно поверхневим опором. Визначальними факторами для поверхневого опору при цьому є, крім матеріалу самого діелектрика і високої температури, ще й характер атмосфери над поверхнею та їхня взаємодія. При надвисоких температурах єдиним електроізоляційним матеріалом є оксидна кераміка, причому на основі майже тільки двох оксидів: оксиду алюмінію  $Al_2O_3$  і оксиду магнію  $MgO$  з різними добавками. Через це, як показано на рис. 4, при надлишку окислювача в продуктах згоряння ( $\alpha > 1$ ) така ізоляція працює в сприятливих умовах і має високе значення поверхневого опору порядку  $10^3$  Ом навіть при температурах  $\sim 2000$  °С на поверхні. При відновлюваній атмосфері, коли в продуктах горіння спостерігається недостача окислювача ( $\alpha < 1$ ), виникає дія не тільки сажистих утворень на поверхню кераміки, а й хімічна взаємодія відновлюваних сполук з поверхнею оксидної кераміки («розкислення» поверхні) з відповідним падінням її електричного опору, зумовленим втратою діелектричних властивостей. Слід зауважити, що така залежність опору внутрішньої ізоляції від газової атмосфери при високих температурах привернула до себе увагу і зазначалася багатьма дослідниками від початку робіт з МГД проблеми [11, 2]. Закономірна дія в такому ж напрямку і плазми, яка як електропровідне середовище не тільки шунтує міжелектродний опір, а й насичує поверхню присадкою – лужними металами K або Na, які забезпечують полегшення іонізації поверхні при високій  $T_{пi}$  і вступають з нею в хімічну взаємодію, що в результаті призводить до падіння опору, рис. 4.

Характерним є результат дії надвисоких температур у каналі на  $R_{ек}$  і  $R_{ме}$  при  $\alpha > 1$ , коли опір після початкового падіння при роботі запальника і в газоповітряному режимі в кисневому режимі стабілізується і не падає до 0, а залишається на рівні  $10^3$ – $10^2$  Ом (рис. 4–6) у досить широкому температурному діапазоні  $T_{пi}$  від 1000 °С навіть до 2000 °С, як не падає до 0 і об'ємний питомий опір чистого електроплавленого діелектрика  $MgO$  в ідеальних для нього окислювальних умовах дослідної печі [6, 7]. При зростанні температури  $T_{пi}$  привертає увагу різний загальний рівень падіння опору ізоляції в каналі і питомого опору діелектричного матеріалу  $MgO$ . Якщо, наприклад, питомий опір діелектрика в печі при зміні температури від 700 °С до 1600 °С падає на 6 порядків [6, 7], то в каналі в такому ж діапазоні температур і навіть у ширшому (від кімнатної до максимальної 1700 °С) опір  $R_{ме}$  падає всього на 2–3 порядки (рис. 4–6). У цьому якісному порівнянні зрозуміло, що в першій половині температурного діапазону, що розглядається, початковий опір ізоляції каналу не може мати високих значень, відповідних високим значенням опору чистого матеріалу діелектрика (через

домішки, клеї тощо), але він також спадає (хоч і ступінчато, а не плавно, як у чистого діелектрика) всього на 1,5–2 порядки, і тому не відповідає падінню питомого опору на 3–4 порядки. У другій половині діапазону, особливо вище температур 1200–1300<sup>0</sup>С, поверхневий опір в каналі R<sub>ме</sub> змінюється ще менше: в межах 0,5–1 порядків, але не зменшується до 0, як і питомий опір діелектрика. Це пов'язано з тим, що вище вказаних температур фактори, які впливають на зниження рівня поверхневого опору, втрачають значення: газова атмосфера стає стійко окислюючою (для забезпечення високої температури продуктів згоряння тримають  $\alpha > 1$ ), найбільш впливові сполуки К, Na при T<sub>п</sub> більше 1200–1300<sup>0</sup>С випаровуються з поверхні, тому властивості поверхні ізоляції наближаються до властивостей чистого діелектричного матеріалу.

Таким чином, дослідження роботи електричної ізоляції при надвисоких температурах показало, що її властивості визначаються, в першу чергу, поверхневим опором. Поверхневий опір, в свою чергу, залежить не тільки від температури, виду і властивостей діелектрика, а й у визначальній мірі – від складу атмосфери, в якій працює ізоляція, і від фізико-хімічної взаємодії цієї атмосфери з поверхнею при даній температурі. Якщо ізоляція виконана на основі оксидних керамік, зокрема MgO та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, то в умовах окислюючої атмосфери її властивості з ростом температури не погіршуються до нульового рівня, а при температурах, вищих за ~ 1300<sup>0</sup>С, починають більше узгоджуватися з властивостями діелектричного матеріалу відповідно температурі.

Повноправним учасником цієї роботи був канд.техн.наук Божко І.В. Автори глибоко вдячні йому за співпрацю.

1. Березин А. МГД-генератор с солнечной энергетикой / <http://science.compulenta.ru/684842/>
2. Залкин В.И., Кириллов В.В., Тихоцкий А.С., Успенская Г.Л., Буренков Д.К., Стрекалов Н.В. Экспериментальное исследование межэлектродного пробоя в МГД-каналах // ТВТ – 1981. – Т.19. – № 5. – С. 1050–1060.
3. Магнитогидродинамическое преобразование энергии. Физико-технические аспекты. – М.: Наука, 1983. – 368 с.
4. Мирошниченко А.А., Страшинин Э.П., Тереховский Б.И., Фальковский Н.И. Исследование электрической изоляции МГД установки // 6th Intern. Conf. on Magnetohydrodynamic Electr. Power Generation. Washington. – 1975. – Vol. 1. – Pp. 471–481.
5. Сканава Г.И. Физика диэлектриков (Область сильных полей). – М.: ГИФМЛ, 1958. – 908 с.
6. Фальковский Н.И., Божко И.В., Примак А.В. Электрическая прочность и электропроводность диэлектриков при высоких температурах / Тез. докладов. Всес. научн. конф. «Физика диэлектриков и новые области их применения». – Караганда. – 1978. – С. 41–42.
7. Фальковский Н.И., Божко И.В., Примак А.В., Тереховский Б.И., Карпенко В.Я. Электрические свойства электроплавленной окиси магния / Инженерные вопросы магнитной гидродинамики. – Киев: Наукова Думка, 1978. – С. 148–153.
8. Швец И.Е., Милях А.Н., Страшинин Э.П. и др. Опытный МГД-генератор Академии наук и Министерства энергетики Украинской ССР // Тр. V Междунар. конф. по МГД-преобразованию энергии. – Мюнхен, 1971. – С. 171–186.
9. Патент РФ № 2400887, кл. H01T13/52 / Буров В.Ф. Свеча зажигания поверхностного разряда. Опубл. 27.09.2010 г.
10. Ottinge Jes. Rensselaer Polytechnic Institute Licenses Novel “Magnetohydrodynamics” Solar Power Technology. / <http://news.rpi.edu/update.do?artcenterkey=3050>.
11. Unkel W., Kruger C.H., Koester J.K. Axial field limitations in MHD Generators // 6th Intern. Conf. on MHD Electrical Power Generation. – Washington, USA, 1975. – Pp. 345–358.
12. US Patent US 5731654, 6H01T 13/52, H01T 13/46 / Benedikt W., Vogel M., Klett D., Herden W. Spark plug having a creeper gap, 24.03.1998.

## ПОСТРОЕНИЕ, МЕТОДЫ И ТЕХНИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИИ ПРИ СВЕРХВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

**Н.И.Фальковский**, канд.техн.наук, **А.В.Примак**

**Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.**

**e-mail: [lerdep7@ukr.net](mailto:lerdep7@ukr.net)**

*Рассмотрены особенности построения, работы и исследований одного из видов высокотемпературной электрической изоляции с рабочей температурой до 2000<sup>0</sup>С. Исследования проведены на действующем МГД генераторе, а также с помощью специально разработанных модельного узла изоляции и устройства для непрерывного измерения и записи сопротивлений и электрической прочности изоляции. Исследованы величины сопротивления электрической изоляции электродов относительно заземленного корпуса канала МГДГ и сопро-*

тивления межэлектродной изоляции в процессе изменения режимов работы МГДГ. Установлено, что сопротивление межэлектродной изоляции определяется её поверхностным сопротивлением. Его величина зависит от вида газовой атмосферы в канале: окислительная повышает поверхностное сопротивление, восстанавливающая его снижает. При температурах выше  $\sim 1300$  °C поверхностное сопротивление начинает больше определяться свойствами материала диэлектрика. Библ. 12, рис. 6.

**Ключевые слова:** электрическая изоляция, высокие температуры, МГД-генератор.

## CONSTRUCTION, TECHNOLOGY AND RESEARCH METHODS IN ULTRAHIGH TEMPERATURE ELECTRICAL INSULATION

Falkovskiy M.I., Prymak O.V.

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy pr., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraina.

e-mail: [lerdep7@ukr.net](mailto:lerdep7@ukr.net)

*This paper features the construction, operation and research on high-temperature electrical insulation at working temperatures up to 2000 °C. Investigations were carried out on the existing MH- generator using a specifically developed insulation module and device for continuous measurement and recording of the resistance and dielectric strength of the insulation under AC current. The studies were conducted using an alternating current in order to reduce the influence of high temperature dielectric polarization on the measurements. The resistance value of the electrical insulation of the electrodes relative to the grounded housing of the MGDG channel and interelectrode insulation resistance pattern during changing operating regimes of MGDG were investigated in the area of the flow of the combustion products at temperatures up to 3000 °C. It was established that the resistance of the interelectrode insulation is determined by its surface resistance. The magnitude of the surface resistance depends on the type of the gas atmosphere in the channel such that the oxidative environment increases the surface resistance and reducing environment decreases it. Under the same temperature conditions the range of changes in the resistance of the interelectrode insulation in the channel was 3–4 orders of magnitude lower than the resistivity of the dielectric (MgO) in pure oxidizing atmosphere of the research apparatus. At temperatures above  $\sim 1300$  °C surface resistance is increasingly determined by the properties of the dielectric. References 12, figures 6.*

**Keywords:** electrical insulation, high temperature, MHD generator.

1. Berezin A. MHD generator to solar energy / <http://science.compulenta.ru/684842/>
2. Zalkind V.I., Kirillov V.V., Tikhotskii A.S., Uspenskaia G.L., Burenkov D.K., Strekalov N.V. Experimental study of the inter-electrode breakdown in the MHD channel // *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. – 1981. – Vol.19. – № 5. – Pp. 1050–1060. (Rus)
3. *Magnetohydrodynamic energy conversion. Physical and technical aspects.* Ed. Acad. Kirillin V.A., Acad. Sheindlin A.E. – Moskva: Nauka, 1983. – 368 p. (Rus)
4. Miroshnichenko A.A., Strashinin E.P., Terekhovskii B.I., Falkovskii N.I. The study of electrical insulation MHD installation. // 6th Intern. Conf. on Magnetohydrodynamic Electr. Power Generation, Washington, 1975. – Vol.1. – Pp. 471–481. (Rus)
5. Skanavi G.I. Physics of dielectrics (high field). – Moskva: Gosudarstvennoe Izdatelstvo Fiziko-Matematicheskoi Literatury, 1958. – 908 p. (Rus)
6. Falkovskii N.I., Bozhko I.V., Primak A.V. Electrical conductivity and dielectric strength at high temperatures. All-Union. Nauchn / Tezisy dokladov Vsesoiuznoi Nauchno-tekhnicheskoi Konferentsii "Physics of dielectrics and new applications", Karaganda, 1978. – Pp. 41–42. (Rus)
7. Falkovskii N.I., Bozhko I.V., Primak A.V., Terekhovskii B.I., Karpenko V.Ja. Electrical properties of magnesium oxide electrofused /Inzhenernye voprosy magnitnoi hidrodinamiki. – Kiev: Naukova Dumka, 1978. – Pp. 148–153. (Rus)
8. Shvets I.E. Miliash A.N., Strashinin E.P. and others. Experienced MHD generator Academy of Sciences and the Ministry of Energy of the Ukrainian SSR /Trudy V Mezhdunarodnoi konf. "MHD conversion to energy", Munich, 1971. – Pp. 171–186. (Rus)
9. Burov V.F. Spark plug surface discharge. / Patent RF, No 2400887, cl. H01T13/52, publ. 27.09.2010. (Rus)
10. Otitigbe Jes. Rensselaer Polytechnic Institute Licenses Novel "Magnetohydrodynamics" Solar Power Technology. Published 01.06.2012. <http://news.rpi.edu/update.do?artcenterkey=3050>.
11. Unkel W., Kruger C.H., Koester J.K. Axial field limitations in MHD Generators // 6th International Conference on MHD Electrical Power Generation, Washington, USA. – 1975. – Pp. 345–358.
12. Benedikt W., Vogel M., Klett D., Herden W. Spark plug having a creepage spark / Patent US 5731654, 6H01T 13/52, H01T 13/46, 24.03.1998.

Надійшла 12.04.2013

Остаточний варіант 15.05.2013