

ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ У МОРІ

© Петро Сопрунюк, Володимир Юзевич, Ярослав Підгірняк, 2002

Фізико-механічний інститут НАН України, вул. Наукова, 5, 79601, Львів, Україна

Розглядаються методи і засоби вимірювання електричних полів рідинних провідних середовищ. Описано принципи роботи та способи реалізації вимірювання електричного поля у середовищі Світового океану. Зокрема, проаналізовано контактні методи вимірювання і засоби їх реалізації із застосуванням комутації електродів різноманітними гідроперемикачами типу сольового моста.

Рассматриваются методы и средства измерения электрического поля в жидких проводящих средах. Описываются принципы работы и способы реализации измерений электрического поля в среде Мирового океана. Анализируются контактные методы и средства измерений, использующие коммутацию электродов разнообразными гидрорелеклячами типа солевого моста.

The work is devoted to the problem of investigation electric field in the liquid environment with conductivity. It described the instrumentation and experimental methods measurement such field with many types of the electrode sensores. Various types of salt-bridge switches is considered.

Вимірювання електричного поля у морській воді має важливе наукове і прикладне значення, оскільки вона вкриває більшу частину земної поверхні. Результати вимірювання електричних полів у морській воді розширюють відповідну геофізичну та геологічну інформацію, необхідну для діагностики ділянок суші, близьких до дна моря, тому питання засобів і методів вимірювання електричного поля у таких рідинних середовищах дає змогу вдосконалити пошукові геологічні роботи і поглибити дослідження в галузі фізики Землі.

Вимірювання електричних полів контактними методами передбачають наявність сенсора, основним елементом якого є електрод, що має гальванічний контакт з досліджуванним середовищем. Електрод – це система з двох струмопровідних тіл: провідника 1-го і 2-го роду [1]. Провідники першого роду – метали, сплави, оксиди з металічною провідністю, а також неметали, зокрема, графіт, у яких носіями заряду є електрони. Провідники 2-го роду – це розплави і розчини електролітів, у них носії заряду – іони. На межі розділу двох середовищ, якими є провідники 1-го і 2-го роду, через несиметричний розподіл заряджених часток виникають поверхневі джерела електрорушійної сили. Внаслідок цього виникає подвійний електричний шар і стрибок потенціалу.

Модель Гельмгольца – найпростіша модель подвійного електричного шару [2], в якій фігурують дві нескінченно наближені поверхні з протилежними

зарядами. Точніші моделі реалістичніше враховують процеси на границі розділу середовищ [3].

Вимірювання електричного поля у морській воді контактним методом описано у працях [4], [5], де, зокрема, одержано вирази для оптимізації геометричних розмірів сенсора. Для найпростішого сенсора, так званої довгої лінії, яка є парою електродів, рознесених на віддаль l_0 , показано, що її чутливість пропорційна до l_0 і не обмежена зверху. Збільшення баз до розмірів, коли проявляється неоднорідність поля, ускладнює інтерпретацію результатів. Інтерпретація і порівняння вимірних величин у результаті електричних і магнітних спостережень вимагають співмірності баз магнітного та електричного сенсорів. Розміри магнітних сенсорів обмежують можливість зниження порогу чутливості довгої лінії.

При реальних довжинах баз близько 1 м шумова складова є невеликою порівняно із завадою, створеною нестабільністю власної різниці потенціалів електродів. Ефективним засобом зменшення дрейфу власної різниці потенціалів електродів є підбір пар електродів. Для кращих зразків хлорсрібних електродів часовий дрейф власної різниці потенціалів дорівнює 1 мкВ/год. Тому основною проблемою таких вимірювань є забезпечення мінімального дрейфу контактної різниці потенціалів електродів.

Дрейф власного потенціалу електродів визначають фізичні процеси у подвійному електричному шарі. Вони залежать від тиску, температури, типу

середовища, наявності у ньому домішок, руху середовища відносно електрода тощо. За умови ідентичності електродів та ідентичності дії перелічених факторів зміни, викликані ними, однакові, і зміна в часі нульового рівня вихідного сигналу відсутня. Мінімізують цей вплив максимальним наближенням електродів один до іншого. Розміщені якнайближче один до одного електроди покращують свою чутливість, коли до них застосувати подовжувачі. Найпростішим варіантом реалізації такого сенсора є так званий диск Лопатнікова [6], де максимально наближені один до одного електроди розділені тонкою діелектричною пластиною. Внаслідок спотворення останньою електричного поля еквівалентна база сенсора перевищує геометричну на декілька порядків. Цим вирішується суперечність між досягненням необхідної чутливості сенсора за рахунок збільшення його бази та за рахунок покращання дрейфових характеристик. Реальний коефіцієнт передачі таких сенсорів співмірний з коефіцієнтом довгої лінії відповідних розмірів, а чутливість становить 0,2 мкВ/м.

Зниження порогу чутливості обмежують шуми обтікання [7], ефективним засобом боротьби з якими є гідродинамічні подовжувачі електролітичних зв'язків [8–10]. Найпростішою їх реалізацією є поміщена в електроліт діелектрична труба, герметично розділена перегородкою, по обидві сторони якої знаходяться електроди. Вода всередині труби є електролітичним провідником, який через відкриті кінці труби з'єднується з середовищем, що оточує трубу. Внаслідок герметичності перегородки струм через трубу не протікає і весь електроліт у кожній з половин знаходиться під потенціалом відкритого кінця свого патрубку, що створює ефект подовження бази сенсора. Різноманітні варіанти реалізацій подовжувачів описано у [5]. Вперше їх застосував Мангельсдорф [11].

Чутливість таких сенсорів обмежується часовою нестабільністю контактної різниці потенціалів електродів. Для усунення цього періодично вимірюються потенціали електродів закорочуванням вимірюваного сигналу. Коли зв'язок між електродами перекритий, вимірюється сума сигналів корисного і напруга контактної різниці потенціалів. За наявності зв'язку вимірюється тільки контактна різниця потенціалів, яка потім віднімається від сигналу попереднього вимірювання. Цим усувається контактна різниця потенціалів електродів з вимірюваного сигналу. Можливі різноманітні

реалізації комутації сигналу [12]. Поріг чутливості гідрокомутаційних сенсорів становить орієнтовно 0,1 мкВ/м [8].

Детальна реалізація такого сенсора описана у [14]. Тут гідроканал виконано у вигляді діелектричної труби, розділеної діелектричною перегородкою, по обидва боки від якої розміщені електроди E_1 та E_2 , підключені до підсилювача. Дві інші перегородки відділяють електроди від гідроканалів. Перегородки приводяться в дію електродвигуном. Зміна опору закритого ключа під час тривалої експлуатації викликає збільшення похибки вимірювання до 20%. Гідроперемикачі з такими заслонками придатні для нетривалих вимірювань.

Вимірювання електричного поля у морському середовищі вимагає забезпечення стійкості відповідних приладів в умовах високих тисків. Порівняння результатів вимірювання магнітного і електричного полів для їх надійної інтерпретації вимагає сенсорів співмірних розмірів [15]. Зменшення електродної бази сенсора приводить до зменшення рівня вимірюваного сигналу, але одночасно з'являється можливість реалізувати ряд переваг, зв'язаних з тим, що електроди працюють в однакових фізико-хімічних умовах. Відсутня похибка, зв'язана з неоднорідністю вимірюваного поля. Застосування гідроперемикачів дає змогу виключати контактну різницю потенціалів електродів з вимірюваного сигналу. Недоліком гідроперемикачів є великі затрати енергії на перемикання ключа через необхідність стискати робочі поверхні. Це обмежує застосування гідрокомутаційних сенсорів поля в морському середовищі. Забезпечивши стабільність параметрів ключа та знизивши його енергетичні затрати, можна значно покращити метрологічні та експлуатаційні параметри гідроключа.

Відомі реалізації ключів гідромодуляційних перетворювачів вимагають герметичного спряження робочих поверхонь рухомої і нерухомої частин [16–18]. Герметичність спряження під час роботи порушується через попадання між робочі поверхні твердих часток, завислих у електроліті. Дія тиску на глибині також є причиною порушення герметичності прилягання робочих поверхонь. Борючись з цим явищем, робочі поверхні притискають одну до одної за допомогою пружин [17, 19]. Стискання робочих поверхонь викликає зростання споживаної гідроперемикачем потужності до 100 Вт і більше, що є небажаним для автономних систем.

У новому типi гiдроперемикачiв цi недолiки усуваються [20]. Мiж робочими iх поверхнями введено зазори приблизно 1 мм. Цей захiд пiдвищує надiйнiсть роботи гiдроперемикачiв, iстотно зменшує споживану потужнiсть, спрощує iх конструкцiю i технологiю виготовлення, дає змогу використовувати вмонтованi малопотужнi магнiтоелектричнi двигуни i робить iх працездатнiшими.

Схеми деяких гiдроперемикачiв показано на рис. 1, де позначено: 1, 2 – гiдроканали; 3, 4 – перегородки; 5, 6 – тонкостiннi шайби; 7 – тонкостiнна рухома цилiндрична камера; 8, 9 – електроднi камери; 10–13 – спряженi вiкна; 14, 15 – екрани, 16 – вал; $\delta_1, \delta_2, \delta$ – зазори, M, N – клеми контактних електродiв. Напряга U знiмається з клем M, N . Вона зв'язана з вимiрюваною напруженiстю електричного поля E сiввiдношенням:

$$U = E \cdot L_i + \Delta\phi,$$

де L_i – коефiцiєнти перетворення, $\Delta\phi$ – власнi ЕРС пари електродiв. Будова сенсора з негерметизованим гiдроперемикачем детальнiше показана на рис. 2, а, де 1, 2 – дiелектричнi труби, вiдкритi кiнцi A i B яких виведено в зовнiшнє середовище 3. Протилежнi кiнцi труб виконано у виглядi заглушок 4, 5. На них розташовано спряженi вiкна 6, 7. Поверхнi заглушок 4, 5 утворюють вузьку щiлину, де розмiщено рухома дiелектричну перепону у виглядi тонкого диска 8. Вона вiддiлена вiд заглушок 4, 5 однаковими зазорами 9, 10. Розмiри зазорiв iстотно перевищують розмiри завислих часток та можливi фiзичнi деформацiї диска. У спряжених вiкнах 6, 7 розмiщено нерухомi дiелектричнi екрани 11, 12, якi не перекривають вiкна повнiстю. Зверненi одна до одної поверхнi екранiв 11, 12 вiддiленi вiд областi перемiщення диска такими самими зазорами, як i заглушки 4,5. На цi поверхнi виведено отвори 13, 14. Вони є зрiзами гiдроканалiв 15,16 i ведуть до контактних електродiв M i N . Окремим випадком компоновання давача є розмiщення диска 8 на осi 17. В цьому випадку центри спряжених вiкон 6, 7, дiелектричних екранiв 11, 12 i отворiв 13, 14 змiщенi вiдносно осi 17 на ексцентриситет G , а в диску 8 зроблено вирiз 18, який повнiстю охоплює вiкна 6,7 в одному з робочих положень диска 8. На рис. 2, б показана еквiвалентна електрична схема сенсора при закритих вiкнах, на рис. 2, в – схема формування електричних потенцiалiв електродiв при вiдкритих вiкнах. Букви K i T позначають область розгалуження елек-

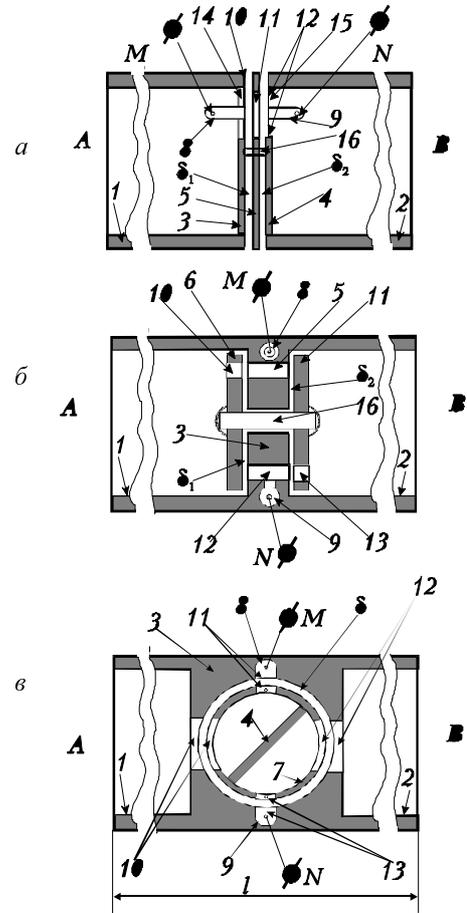


Рис. 1. Типи гiдроперемикачiв

тролiтичного кола в проsviтах спряжених вiкон 6, 7. Буквами E, ϕ, J позначено локальнi значення напруженостi електричного поля, потенцiалу i струму. Пристрiй працює за рахунок перебудови електролiтичних зв'язкiв вимiрювальних електродiв мiж собою i зовнiшнiм середовищем, яка вiдбувається при перемiщеннi дiелектричного диска 8.

Якщо диск 8 повнiстю перекриває вiкна 6,7 вiдкритих кiнцiв дiелектричних труб 1,2 довжиною L кожна прикладено потенцiали $\phi_{1,2}$:

$$\phi_{1,2} = \pm E \cdot \left(L + \frac{D}{2} \right) \approx \pm E \cdot L,$$

де D – ширина щiлини мiж заглушками 4,5.

По електролiтичних шляхах АКС i СТВ течуть струми I_1 i I_2 :

$$I = \pm \phi_{1,2} / (R_{1,2} + R_{mp1,2}),$$

де $R_{1,2}$ – опiр електролiтичних шляхiв КС i СТ мiж диском 8 i заглушкою 4,5 $R_{mp1,2}$ – опiр електролiтичних шляхiв АК i ТВ в трубах 1,2.

Тоді

$$R_{1,2} = [\ln(\Phi_4 / \Phi_2)] / 2\pi\sigma d_{1,2};$$

$$R_{mp1,2} = 4L / \pi\sigma\Phi_3^2,$$

де $d_{1,2}$ – ширина зазорів 10,11; σ – електропровідність електроліту; Φ_2 – діаметр вікон 6,7; Φ_4 – внутрішній діаметр труб 1,2 заглушок 4,5.

Напруга на електродах M, N та їх власні потенціали e_M і e_N зв'язані співвідношенням:

$$U_1 = E \cdot L_1 + (e_N - e_M).$$

Еквівалентна база сенсора у закритому стані ключа:

$$L_1 \cong 2L(1 - 4L(d_1 + d_2) / \Phi_3^2 \ln(\Phi_4 / \Phi_2))$$

Схема формування потенціалів для випадку, коли диск 8 повернуто так, щоб не перекривати спряжених вікон 6, 7 показана на рис. 2. Під впливом різниці потенціалів $\Delta\phi \cong 2EL$, прикладеної до відкритих кінців A, B діелектричних труб 1, 2 по електролітичному шляху $AKTB$ проходить струм I_0 :

$$I_0 = 2EL / (2R_{mp1,2} + R_{km}),$$

де R_{KT} – опір електролітичного шляху КТ в щілинах вікон 6,7 і між ними:

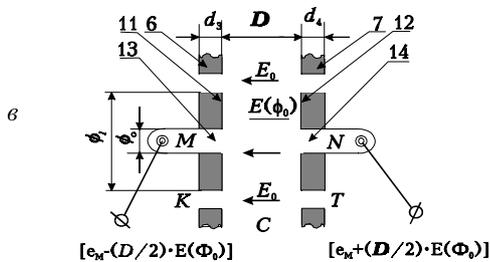
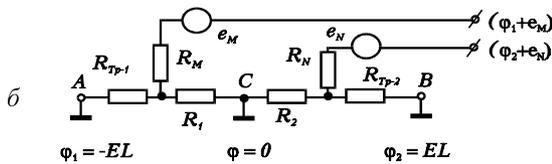
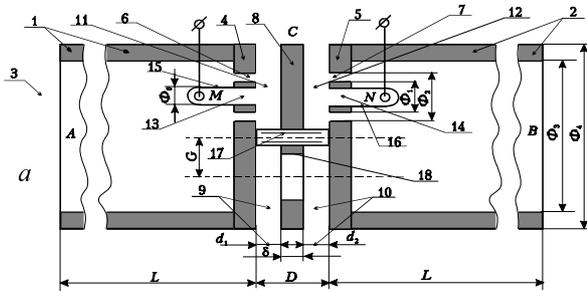


Рис. 2. Негерметизований гідроперемикач

$$R_{km} \cong 4(d_3 + d_4 + D) / \pi\sigma(\Phi_2^2 - \Phi_1^2),$$

де d_3, d_4 – довжини каналів.

Під впливом струму I_0 на шляху КТ виникає поле з напруженістю E_0 :

$$E_0 = E / [(\Phi_2^2 - \Phi_1^2) / \Phi_3^2 + (d_3 + d_4 + D) / 2L]$$

Напруга, що знімається з електродів, при відкритому стані гідроперемикача з врахуванням їх власної різниці потенціалів подається співвідношенням:

$$U_2 = E \cdot L_2 + (e_N - e_M),$$

де L_2 – еквівалентна база сенсора при відкритому гідроперемикачі:

$$L_2 = \frac{[D \exp(-\pi\Phi_1 / 2D)]}{[(\Phi_2^2 - \Phi_1^2) / \Phi_3^2 + (d_3 + d_4 + D) / 2L]}.$$

Вирази для $L_{1,2}$ встановлюють зв'язок між вимірним сигналом, вимірюваним полем E та іншими параметрами сенсора.

Реальні параметри сенсора: $\Phi_0 = 10$ мм, $\Phi_1 = 22$ мм, $\Phi_2 = 34$ мм, $\Phi_3 = 100$ мм, $\Phi_4 = 130$ мм, $d_3 = d_4 = 20$ мм. Товщина диска $\delta = 2$ мм, $G = 0$ мм, $G = 27$ мм. Значення $2L$ можуть бути різноманітні, конкретно: 73,2 мм, 296 мм, 548 мм, 1050 мм.

Підвищення точності вимірювання параметрів електричного поля досягнуто у гідроперемикачі, який зображено на рис. 1, б. Тут діелектричні труби 1, 2 діаметром Φ_{mp} утворюють гідроканали, що ведуть до діелектричного корпусу 3, виконаного у вигляді диска товщиною d з плоскопаралельними торцями. З ними труби 1, 2 з'єднані герметично. Відкриті кінці А, Б труб 1, 2 виведені у зовнішнє середовище, де наявне вимірюване електричне поле напруженістю E . Труби створюють вимірювальну базу довжиною L . В корпусі 3 є наскрізні осепаралельні отвори 11, 12 діаметром Φ_1 . Центри цих отворів зміщені на однакову віддаль D в протилежні боки від осі корпусу. В корпусі розміщені електродні камери 8, 9, які сполучені з отворами 11, 12 каналами. В ці камери поміщені електроди. По осі корпусу 3 є наскрізний отвір. На валу 16 встановлено тонкостінні діелектричні шайби 5, 6 діаметром Φ_2 , дещо меншим, ніж діаметр труб 1, 2. Віддаль між шайбами $l, l \geq l_1$, а зазори δ_1, δ_2 між шайбами 5, 6 і корпусом 3 однакові.

Тонкостінні шайби 5, 6 виконані з наскрізними осепаралельними отворами 10, 13 діаметром Φ_1 . Центри цих отворів зміщені на віддаль D в протилежні сторони від осі корпусу 3. Отже, осі отворів 10–13

проходять через одне коло. Електроди під'єднані до клем M, N вхідного підсилювача постійного струму.

У першому робочому положенні гідроперемикача коефіцієнт перетворення сенсора L_{e1} .

При повороті активної частини гідроключа з першого основного положення на 180° такий самий, як і у першому положенні, сигнал передається електродам в протилежній полярності. Напруга U_{x2} неробочого ходу сенсора, що знімається з клем M, N , дорівнює:

$$U_{x2} = E \cdot L_{e2} + (e_2 - e_1),$$

де $L_{e2} = -L_{e1}$.

В цьому випадку:

$$U_{x1} - U_{x2} = E \cdot 2L_{e1},$$

де $2L_{e1}$ – результуючий коефіцієнт перетворення сенсора.

У сенсора з $L = 1$ м при діаметрі труб, диска і тонкостінних шайб : $\Phi_{тр} = \Phi_2 = 0,2$ м, товщині диска $d = 25$ мм, товщині зазорів між диском і товстостінною шайбою $\delta = 0,5$ мм, діаметрі отворів у дисківі і тонкостінній шайбі $\Phi_2 = 35$ мм та ексцентриситеті цих отворів $D = 43,8$ мм, $\sigma = 1 \text{ Ом}^{-1}$ $L_{e1} = 1,615$ м

Через наявність зазору між активною і пасивною частинами гідроключа реальний ефективний коефіцієнт перетворення сенсора з негерметичним гідрокомутатором завжди менший за величину:

$$2L(1 + \pi\Phi_{тр} / 8),$$

яка є коефіцієнтом перетворення сенсора з нульовими зазорами.

Зображена на рис. 2, в інша реалізація такого сенсора має підвищену механічну міцність. Рухома частина гідроперемикача виконана у вигляді циліндричної оболонки. Оболонка поміщена в циліндричну камеру, де є з'єднуючі отвори для електролітичного сполучення з патрубками. Між оболонкою і камерою є зазор, інші параметри аналогічні як у сенсорі на рис. 1, б.

Похибка вимірювання, спричинена комутацією сигналу, дорівнює нулю, коли коефіцієнт комутації $m = 1$. Зменшення цієї похибки досягається зменшенням еквівалентної бази сенсора у відкритому стані гідрокомутатора до нульового значення [21]. Застосована у попередніх випадках плоска заслонка не може забезпечити вказаних вимог. Схематично такий сенсор показано на рис. 3, де електроди $E1, E2$ розміщено в одній площині і у центрі гідродинамічних подовжувачів 2, 3. Тут конструктивно забезпечена можливість

виконання вказаних вимог для закритого гідроперемикача, а також відкритого. Фігурна заслонка принципово може повертатися тільки на 90° , на відміну від плоскої, яка застосовується раніше, де поворот здійснюється на 180° . Це формує дещо інші вимоги до електроприводу гідроперемикача та режиму його роботи.

Заслонка гідроперемикача для вказаного на рис. 3 випадку знаходиться у закритому стані.

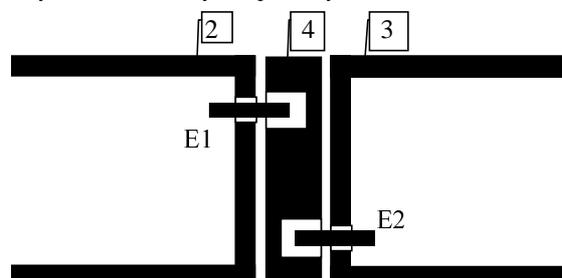


Рис. 3. Сенсор електричного поля з фігурною заслонкою

Описані вище сенсори електричного поля дають змогу вирішити і практично реалізувати проблему автономних вимірювань електричного поля у морському середовищі поблизу морського дна при забезпеченні необхідного для геофізичних та пошукових досліджень порогу чутливості – 10^{-8} В/м та енергоспоживання 0,1 Вт.

1. Химия: Справ. изд. / В. Шретер, К.-Х. Лаутеницгер, Х. Бибрак и др. М., 1989. 2. Иосель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г., Вопросы расчета и моделирования электрохимической защиты судов от коррозии., Л., 1965. 3. Юхновский И.Р., Курьяк И.И. Электролиты.– К., 1988. 4. Кочанов Э.С., Зимин Е.Ф. Измерение электрического поля токов проводимости в сверхнизкочастотном диапазоне (Обзор) / Радиотехника и электроника, том XXVII, вып. 7, 1982.–С. 1249-1267. 5. Зимин Е.Ф., Кочанов Э.С. Измерение параметров электрических и магнитных полей в проводящих средах. –М., 1985. 6. Лопатников В.И., Некоторые результаты исследования естественного электрического поля в море // Тр. Морс. геофиз. ин-та АН УССР. – К., 1966. 7. Бутров Ю. П., Попенко М. В., Цибульский Ю. Л. Экспериментальная проверка безбазового метода измерений электрического поля в море // Морские геофизические исследования. – 1978. – № 1 (180). – С. 157–163. 8. Бубнов В. А., Соловьев А. А., Скоробогатов В. А. Об измерении электрических потенциалов в электрогидродинамических течениях // Инж.-физ. журн. – 1970. – 32, № 3. – С. 540–541. 9. Гнусин Н. П., Поддубный Н. П., Маслий А. И. Основы теории расчета и моделирования электрических полей в

- электролитах. – Новосибирск: 1972. 10. Турлыгин С. Я., Корнева Л. А. О контактных электродах для измерения электрического тока и напряжения в море // Тр. Мор. геофиз. ин-та АН СССР. – 1956. – 7. – С. 3–14. 11. Mangelsdorf P. C. The worlds longest salt-bridge // *Marine science instrument*. V. 1. – New York: Plenum press, 1962. – P. 173–185. 12. Filloux J. H. Techniques and instrumentation for study of natural electromagnetic induction at sea // *Physiecs of the Earth and planetary interiors*. – 1973. – 7. – P. 323–338. 13. Клековкин В.А., Кротевич Н.Ф., Пануровский В.И., Селятицкий В.Г. Современное состояние измерений слабых электромагнитных полей., М., 1974. 14. Новыш В.В. К теории ошибок измерений морским электрополюмером ЭМП // *Исследование геомагнитного поля в акваториях морей и океанов*. – М.: ИЗМИРАН, 1978. – С. 191–199. 15. Morat P. Applcation des mtsures des champs magnetique et electrique a la connaissance de la poure et des courants. – 2e Collog // *Inst. Exploit oceans, Bordcau*. – Paris: SA, 1974. – V. 2. – P. 1–23. 16. А. с. 940042 СССР. Электрометрическое буксируемое устройство для проведения измерений в жидких средах / М. М. Богородский. – Оpubл. 23.09.82, Бюл. № 24. 17. Богородский М. М. Трехмерная дивергентная электрометрическая установка // *Аппаратура для исследования геомагнитного поля*. – М.: 1983. 18. Александров В. В. Естественное электрическое поле в озерах // *Гидрофизические исследования озер*. – М.: 1973. 19. А. с. 1067456 СССР. Способ изготовления неполяризующихся графитовых электродов для электроразведки / М. М. Богородский и др. – Оpubл. 21.07.84, Бюл. № 2. 20. Сопрунюк П. М., Богородский М. М., Підгірняк Я. Е. Глибоководний первинний вимірювальний перетворювач квазіпостійного електричного поля // *Сб. тр. междунар. науч.-техн. семинара "Морское и экологическое приборостроение"*. – Севастополь, 1995. – С. 19–20. 21. Сопрунюк П. М., Сопрунюк Н. Г., Підгірняк Я. С. Контактний метод неперервного контролю за концентрацією інгібіторів корозії у водооборотних системах // *Механіка руйнування і міцність матеріалів*. – Львів: 1999.