

2. Glebov, V. P. (1979). Zhelezookisnye otlozhenija i ih vlijanie na nadezhnost' kotlov sverhkriticheskogo davlenija. Moscow, 41.
3. Sandulyak, A. A. (2005). Sovershenstvovanie rezhimov i sistem magnitnoj ochistki tehnologicheskikh sred dlja preduprezhdenija chrezvychajnykh situacij pri jekspluatácii jenergeticheskogo oborudovanija. Moscow.
4. Kirichenko, V. S., Zaharova, G. P., Durachenko, L. I. (1974). O metodah opredelenija form zheleza v vodah teplojenergeticheskikh ustanovok (TJeU). Barnaul, 37–38.
5. Sandulyak, A. V., Yatskov, N. M., Shepel, N. I. (1985). Metodika kontrolja magnitnykh svojstv osadkov pri ochistke gidkostej. Himija i tehnologija vody, 7 (2), 61–63.
6. Mankin, I. I. (1977). Fiziko-himicheskie processy v parovodjanom cikle jelektrostantsij. Jenergija, 256.
7. Griazev, A. M. (1972). Issledovanie povedenija oksilov zheleza v sushhestvujushchih fazah voda-pap i ih vlijanie na opganizaciju vodnogo pezhima teplojenergeticheskikh ustanovok. Moscow, 18.
8. Sandulyak, A. V., Fedotkin, I. M. (1983). Magnitnoe obezželevivanie kondensata. Moscow: Jenergoatomizdat, 83.
9. Sandulyak, A. V. (1988). Magnito-fil'tracionnaja ochistka zhidkostej i gazov. Moscow: «Himija», 136.
10. Sandulyak, A. V., Dakhnenko, V. L., Klepach, N. I. (1989). Sovershenstvovanie uzla ochistki v magnitnykh fil'trah. Himicheskaja tehnologija, 5, 40–45.
11. Muradova, R. A. (2006). Voprosy jelektromagnitnogo fil'trovanija tehnologicheskikh zhidkostej na osnove osazhdenija zhelezosoderzhashchih chastic v vysokogradientnom magnitnom pole. Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij i jenergeticheskikh ob#edinenij SNG. Jenergetika: mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij i proizvodstvennyj zhurnal, 3, 85–91.
12. Korhov, O. Ju. (1988). Razrabotka konstrukcij i rezhimov raboty magnitnykh fil'trov dlja ochistki kondensatov jelektrostantsij s cel'ju povysenija ih jeffektivnost. Dnepropetrovsk.
13. Ershova, V. A. (2007). Issledovanie harakteristik rabochih zon magnitnykh ochistnykh apparatov kak sredstv preduprezhdenija chrezvychajnykh situacij v uslovijah korrozii i iznosa oborudovanija. Moscow.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Корнієнком Я. М.  
Дата надходження рукопису 23.04.2015*

**Дахненко Валерій Леонідович**, доцент, кандидат технічних наук, кафедра машин і апаратів хімічних та нафтопереробних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056  
E-mail: dvl2@meta.ua

УДК 621.187.125

DOI: 10.15587/2313-8416.2015.42629

## ДО КОМПОНОВКИ РОБОЧОЇ ЗОНИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ФІЛЬТРА ВЕЛИКОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ

© В. Л. Дахненко

*Вирішується задача визначення основних параметрів робочої зони електромагнітного фільтра великої продуктивності у поєднанні із умовами намагнічування сорбційної насадки. Описаний взаємозв'язок розташування насадки магнітного фільтра по відношенню до намагнічуючої системи, визначені залежності між параметричними характеристиками фільтраційної зони та основними характеристиками використання магнітного поля*

**Ключові слова:** соленоїд, фільтруюча насадка, магнітна індукція, ефективність

*The problem of determining the main parameters of the working area of the electromagnetic filter with high productivity combined with the terms of the magnetization of sorption nozzle is solved. Relationship of arrangement of nozzle of the magnetic filter towards magnetizable system is described, relationship between parametric performance filtration area and the main characteristics of the use of the magnetic field are defined*

**Keywords:** solenoid, filter cap, magnetic induction, efficiency

### 1. Вступ

Одним з важливих показників ефективності, надійності й довговічності роботи теплоенергетичного обладнання є ступінь чистоти теплоносія від різного роду домішок. Їхня наявність у теплоносії приводить до утворення відкладань на теплообмінних поверхнях, що погіршує теплопередачу, а для пароводяних трактів котлоагрегатів ця причина, є найбільш уразливою ланкою технологічної схеми електричних станцій.

Залізоокисні домішки у конденсаті становить основну долю забруднень води, що надходить у котли [1, 2]. Вони є причиною відкладань на теплообмінних поверхнях, що приводить до перегріву стінок

труб на 100–140 °С вище температури чистої труби і може досягати 600–650 °С. Ця обставина приводить до перевитрати палива й зростання ризику розриву поверхонь нагрівання [2].

### 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Основна частина залізоокисних домішок має магнітосприйнятливі властивості [2–4], що дозволяє застосувати для їх вилучення магнітне поле. Метод реалізується за допомогою пристроїв, що називаються магнітними фільтрами, в яких як робочий орган (сорбційного об'єму) використовується намагнічувана гранульована насадка [3, 5], яка намагнічується

системою, що знаходиться, як правило, поза об'ємом насадки і відокремлена від середовища, що очищається. Робота пристрою ґрунтується на силевій магнітній взаємодії між намагніченими гранулами насадки і частинками. На рис. 1 наведена схема соленоїдного типу магнітного фільтра, в якому намагнічення насадки здійснюється соленоїдною електромагнітною котушкою [3, 5, 6], в якому основним робочим органом є намагнічена насадка, крізь яку фільтрується середовище. Її сорбційні властивості залежать, в основному, від рівня її намагнічування [3, 5, 6].

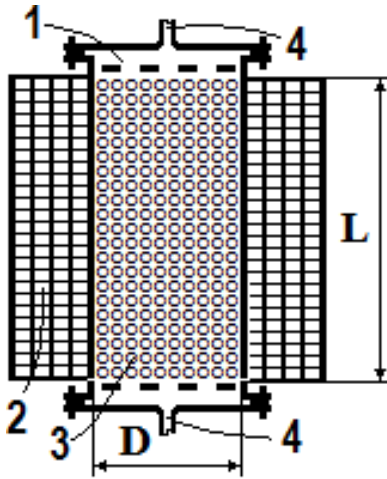


Рис. 1. Схема соленоїдного магнітного фільтра:  
1 – корпус, 2 – котушка намагнічування, 3 – насадка, 4 – патрубкі

Така, здавалося б оптимальна, конструкція має суттєвий недолік. Виявилось, що енергія поля не використовується у повній мірі з-за впливу розмагнічуючого чинника, наявність якого обумовлена геометричними розмірами. Так, для підвищення продуктивності, зазвичай, збільшувалася площа прохідного перетину вузла очищення за рахунок збільшення діаметру (D) (рис. 1), що приводить до зниження відношення довжини котушки L (2), що намагнічує (і насадки 3), до її діаметру D.

При пониженні L/D неминучі втрати поля. Так, при відносному відносному габариті котушки соленоїда  $L_k/D_k < 1$  середнє значення напруженості поля складає до 70 % від потенційно досяжного значення напруженості поля за рахунок розсіювання поля коротким соленоїдом в оточуюче середовище [7, 8].

Відносне "вкорочування" (за рахунок зростання D) насадки, що фільтрує, перетворюючи її на короткий, квазісуцільний магнетик із властивим для нього високим значенням розмагнічуючого чинника. Внаслідок чого знижується середня магнітна індукція насадки **B** у порівнянні зі значенням цієї індукції **B<sub>0</sub>**, що досягається при намагніченні відносно довгого зразка.

Наприклад, при  $L/D < 1$ ;  $B/B_0 < 0,5$ , що означає, що в таких "коротких" насадках середнє значення індукції поля складає до 50 % від потенційно можливого значення (рис. 2).

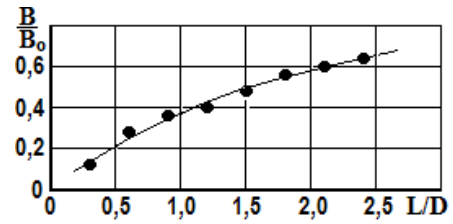


Рис. 2. Залежність відносних значень середньої магнітної індукції насадки від відносного габариту соленоїда і насадки (з використанням даних [9])

### 3. Мета і задачі дослідження

Тому актуальним є питання розробки економічних електромагнітних фільтрів великої продуктивності. Необхідно визначити раціональну компоновочну схему робочої зони магнітного фільтра у поєднанні із умовами її намагнічування.

Одним з рішень цієї проблеми є компонування насадки аналогічно сердечникам у ряді трансформаторів за схемою броньового типу, коли насадка цілком оточує соленоїд (рис. 3). У цьому випадку насадка 3 є магнітопроводом для замикання магнітного потоку, що генерується соленоїдом 1 і додатковою робочою зоною фільтра.

### 4. Методи дослідження

Дослідження компоновочної схеми провадився шляхом експериментальних досліджень із отриманням значень магнітного потоку в різних зонах насадки і перерахунком в індукцію магнітного поля при зміні основних компоновочних характеристик: відносного габариту соленоїда L/D, а також відношення площ сердцевинної (усередині соленоїда) і наручної частин насадки  $S_n/S_c$  у фільтрі броньового типу на відносну індукцію  $B_c/B_{дв}$  із урахуванням товщини торцевого шару, й того, що розширяється в діаметрі шару насадки  $\Delta_r \approx D/4$  знаходили у відповідності перетину сердцевинної частини насадки  $S_c \approx d^2/4$  мінімальному перетину цього шару  $S_r \approx \pi D \Delta_r$ , оскільки він є продовженням сердцевинної частини насадки (рис. 3).

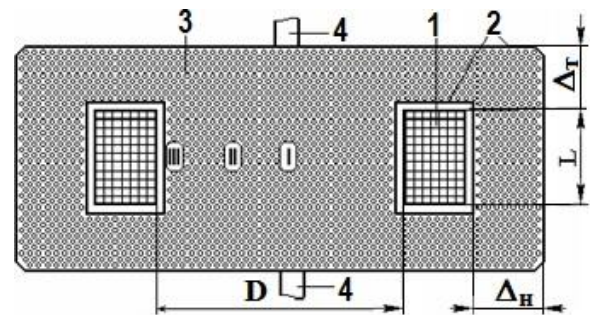


Рис. 3. Схема короткокоотушечного електромагнітного фільтра броньового типу: I-II-III – зони відповідно центральна, рівновіддалена від центру й периферії насадки, периферійна

### 5. Результати досліджень

Обробка значень  $B_c/B_{дв}$  в залежності від зміни L/D і  $S_n/S_c$  для компоновочної схеми (рис. 3) приведені координатах дефіциту відносних значень індукції магнітного поля від основних параметрів компоновки (рис. 4)

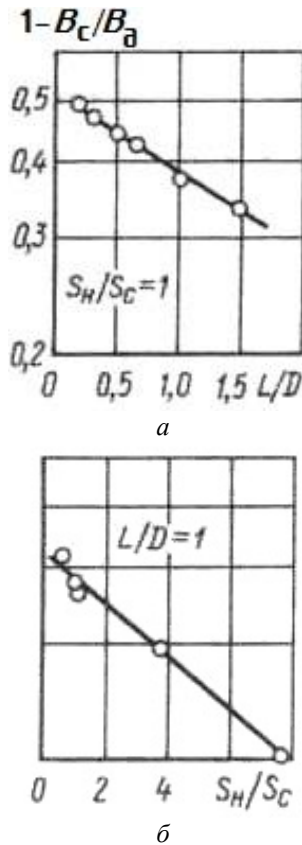


Рис. 4. Залежності дефіциту відносних значень індукції в серцевинній частині насадки: а – від відносного габариту котушки  $L/D$ ; б – від взаємного відношення площ зовнішньої й внутрішньої частин насадки  $S_H/S_C$

Обробка значень  $B_c/B_d$  в залежності від зміни  $L/D$  і  $S_H/S_C$  дозволило отримати взаємозв'язок параметрів фільтра й припустимого значення  $B_H/B_C$ :

$$L/D + S_H/S_C = L/D + 2 \sqrt{\Delta_H / D} = 1,25 \ln(2,2 B_C/B_H). \quad (1)$$

За рівнем намагніченості фільтруючої насадки фільтри броньового типу виграють у порівнянні з фільтрами соленоїдного типу в 1,9...1,5 рази для співвідношень  $L/D = 0,5...1,0$ . У фільтрах слід урахувати перерозподіл рівня намагніченості різних зон серцевинної частини насадки. Наприклад, у зонах насадки I, II і III (рис. 3) при малих  $L/D$  рівень намагніченості різний, і в міру зменшення  $L/D$  ця відмінність збільшується (рис. 6). Поблизу котушки значення  $B_c/B_d$  збільшується, а в її центрі зменшується, що свідчить про переважне замикання магнітного потоку по периферійній зоні серцевинної частини насадки.

Тому при реальному конструюванні електромагнітних фільтрів такого типу існує взаємовиключаючі параметри: зниження відносного габариту соленоїда, при якому рівень намагніченості зовнішньої частини насадки ( $B_H$ ) наближається до аналогічного показника насадки внутрішньої області ( $B_C$ ), але приводить до неоднорідного намагнічування об'єму останньої (рис.7). Ця обставина ставить перед необ-

хідністю «компенсації» цього недоліку зміною інших технологічних параметрів, наприклад, різною швидкістю фільтрування в кожній зоні насадки, розділивши внутрішню її частину на розділені об'єми перегородками (рис. 6).

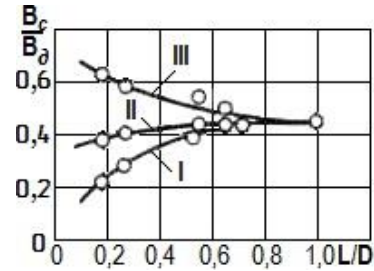


Рис. 5. Залежності середніх відносних значень індукції в різних зонах внутрішньої частини насадки від відносного габариту соленоїда: I-III – те ж, що на рис. 1

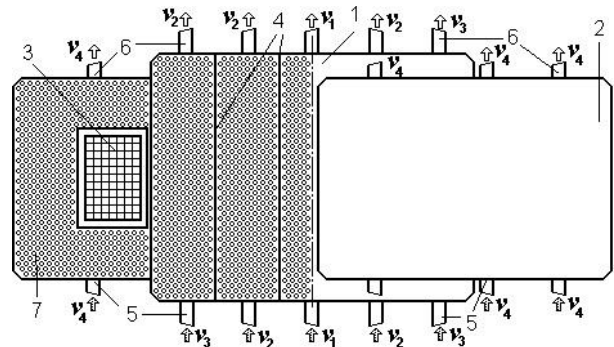


Рис. 6. Варіант конструктивного виконання електромагнітного фільтра броньового типу; 1 – внутрішній корпус; 2 – бокові корпуси; 3 – соленоїд; 4 – коаксимальні перегородки; 5 – штуцера подачі; 6 – штуцера відводу; 7 – фільтруюча насадка

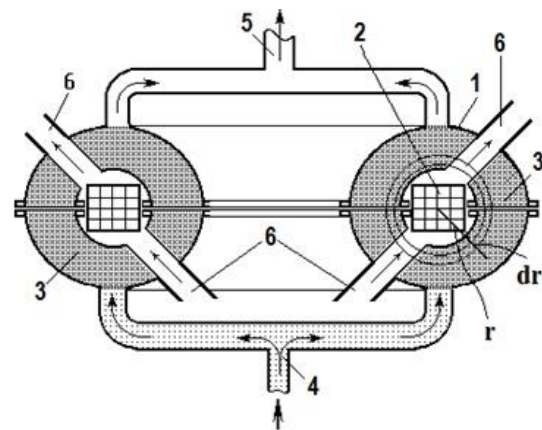


Рис. 7. Схема промислового магнітного фільтра броньового типу: 1 – корпус; 2 – соленоїдна котушка намагнічування; 3 – фільтруюча насадка; 4, 5 – трубопроводи подачі та виводу очищеного середовища; 6 – повітропроводи для охолодження котушки

Але для реалізації такого рішення повинно забезпечуватись автономне фільтрування в кожній з

областей, що забезпечує швидкість фільтрування, відповідно  $v_1, v_2, v_3$ , згідно відношенням:  $B_1/v_1=B_2/v_2=B_3/v_3$ , при відомих  $B_1, B_2, B_3$ , з огляду на вплив  $v$  і  $B$  в ефективність очищення  $\psi$ . Конструкція додатково ускладнюється і вимагає рішення технічної проблеми, як забезпечення надійного теплового режиму котушки, повністю оточеної оболонками і насадкою. Остання обставина є не тільки технічною задачею, але торкається проблеми безпеки роботи пристрою.

Спрощення конструкції шляхом виключення центрального об'єму, оточуючи насадкою лише тіло котушки (рис. 7), а охолодження здійснюється за рахунок додаткових колекторів.

Реалізувати очевидні переваги виявилось складною технічною задачею. Для цього випадку виключається малопродуктивний центральний об'єм. Насадкою охоплена сама котушка намагнічування, утворюючи тороподібну оболонку (рис. 7). Така схема припускає, що потік магнітного поля, що генерується котушкою "концентрується" у насадці.

А тому необхідно визначити рівень намагнічування запропонованої зони, адже реалізація очевидної переваги супроводжується іншою складною технічною задачею. Котушка намагнічування закрита оболонками тороподібного корпусу і насадкою (рис. 7). А це означає, що ефективна робота соленоїда супроводжується додатковим нагріванням (не тільки з боку теплоносія), а тому слід визначити основні параметри намагнічування.

Для цього умовно виділяємо в насадці елементарний шар товщиною  $dr$  ( $r$  – радіус) можна записати, що зміна потоку магнітної індукції через елементарний майданчик  $ds$ :

$$d\Phi=B \cdot ds. \tag{2}$$

Враховуючи, що індукція насадки залежить від напруженості магнітного поля ( $B = \mu\mu_0 \cdot H$ ), а враховуючи особливості намагнічування мана садки магнітних фільтрів в реальному діапазоні поля ( $H=30\dots100$  кА/м)  $B \sim H^f$ , тому

$$d\Phi = \mu k H^f \cdot dS. \tag{3}$$

Враховуючи, що напруженість магнітного поля навколо провідника описується зв'язком  $H = \frac{I}{2\pi r}$ , де  $I$  – кількість амперів-витків,  $r$  – далекість від котушки, а  $ds=l \cdot dr$ , тоді (3)

$$d\Phi = \mu_0 k \left( \frac{I}{2\pi} \right)^{1-f} \cdot l \frac{dr}{r^{1-f}}, \tag{4}$$

тоді потік магнітного поля  $\Phi$ :

$$\Phi = \mu_0 k \left( \frac{I}{2\pi} \right)^{1-f} l \frac{1}{f} (r_2^f - r_1^f). \tag{5}$$

У цьому випадку середня магнітна індукція, наведена до площі насадки  $S = l \cdot (r_2 - r_1)$

$$B_{cp} = \mu_0 k \left( \frac{I}{2\pi} \right)^{1-f} \frac{r_2^f - r_1^f}{f(r_2 - r_1)}. \tag{6}$$

Слід мати через, що величина  $I$  являє собою кількість амперів-витків  $I=i \omega$  ( $i$  – струм живлення,  $\omega$  –

кількість витків котушки) або через щільність струму живлення  $j$  і загальну струмоведучу площу котушки  $S$ :

$$I = i \cdot \omega = j \cdot S_{II} = j \cdot k_3 \cdot S_K, \tag{7}$$

де  $k_3$  – коефіцієнт заповнення проведенням вікна котушки площею  $S_K$ .

### 6. Обговорення результатів

Дослідження показали, що відомі соленоїдні електромагнітні фільтри є неефективними для їх використання в технологічних системах великої продуктивності (100 м<sup>3</sup>/год і більше) з точки зору енергетичних витрат.

Компонування схема фільтру броньового типу, із розміщенням насадки навколо котушки намагнічування і усього її внутрішнього простору має суттєві недоліки з причин неоднорідності намагнічування усього об'єму насадки, а також створює складності в обслуговуванні пристрою.

Схема компоновки основних елементів із наявністю оболонок, що відокремлює котушку намагнічування від насадки (фільтр працює під тиском). Тому можна виконувати котушку циліндроподібного перетину. Згідно схеми (рис. 7), з урахуванням останнього уточнення, необхідний струм для намагнічування насадки:

$$I = j \cdot k_3 \cdot \pi \cdot r_{12}. \tag{8}$$

Для варіанту фільтруванні рідини вздовж витків котушки зі швидкістю  $v$ , продуктивність:

$$Q = v \cdot F = v \cdot \pi (r_2^2 - r_1^2). \tag{9}$$

Запропоновані рівняння є ключовими для технічного розрахунку основних параметрів при розробці магнітного фільтра великої продуктивності для очищення рідин та газів від зілізовмістких, магнітних домішок.

### 7. Висновки

Виявлені недоліки компоновочних схем відомих електромагнітних фільтрів з точки зору їх продуктивності.

Запропонована схема компоновки магнітного фільтру броньового типу із розташуванням фільтруючої насадки навколо намагнічуючої котушки.

Отримані залежності для визначення основних габаритних розмірів сорбційної зони фільтра із узгодженням характеристик намагнічуючої системи.

### Література

1. Акользин, П. А. Коррозия металлов котлов. [Текст] / П. А. Акользин. // Итоги науки и техники. Коррозия и защита от коррозии. ВИНТИ. – 1986. – Т. 12. – С. 260–296.
2. Манькина, И. И. Физико-химические процессы в пароводяном цикле электростанций. [Текст] / И. И. Манькина. – М.: Энергия, 1977. – 256 с.
3. Сандуляк, А. В. Магнитофильтрационная очистка жидкостей и газов. [Текст] / А. В. Сандуляк. – М.: Химия, 1988. – 137 с.
4. Сандуляк, А. В. Роль магнетита в составе примесей воды при ее магнитной очистке [Текст] / А. В. Сандуляк // Химия и технология воды. – 1985. – Т. 7, № 3. – С. 82–84.
5. Сандуляк, А. В. Магнитное обезжелезивание конденсата. [Текст] / А. В. Сандуляк, И. М. Федоткин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 87 с.

6. Сандуляк, А. В. Закономерности осаждения железосодержащих примесей конденсата в намагниченной шаровой насадке [Текст] / А. В. Сандуляк, В. З. Кочмарский, В. Л. Дахненко // Энергетика. – 1980. – № 8. – С. 56–62.

7. Сандуляк, А. В. Недостатки соленоидных электромагнитных фильтров [Текст] / А. В. Сандуляк, В. Л. Дахненко // Энергетика. – 1990. – № 3. – С. 63–65.

8. Сандуляк, А. А. Аналитическое описание коэффициента размагничивания разнородных сердцевин цепочек гранул фильтр-матрицы магнитного сепаратора [Текст] / А. А. Сандуляк // Вестник МГСУ. – 2013. – № 9. – С. 62–69.

#### References

1. Akol'zin, P. A. (1986). Korrozija metallov kotlov. Itogi nauki i tehniki. Korrozija i zishhita ot korrozii. VINITI, 12, 260–296.

2. Man'kina, I. I. (1977). Fiziko-himicheskie processy v parovodjanom cikle jelektrostantsij. Moscow: Jenergija, 256.

3. Sanduljak, A. V. (1988). Magnitofil'tracionnaja ochistka zhidkostej i gazov. Moscow: Himija, 137.

4. Sanduljak, A. V. (1985). Rol' magnetita v sostave primesej vody pri ee magnitnoj ochistke. Himija i tehnologija vody, 7 (3), 82–84.

5. Sandulyak, A. V., Fedotkin, I. M. (1983). Magnitnoe obezshelezivanie kondensata. Jenergoatomizdat, 87.

6. Sandulyak, A. V., Kochmarsky, V. Z., Dahnenko, V. L. (1980). Zakonomernosti osazhdenija zhelezosodezhashhih primesej kondensata v namagnichennoj sharovoj nasadke. Jenergetika, 8, 56–62.

7. Sandulyak, A. V., Dahnenko, V. L. (1990). Nedostatki solenoidnyh jelektromagnitnyh fil'trov. Jenergetika, 3, 63–65.

8. Sandulyak, A. A. (2013). Analiticheskoe opisanie kojeficienta razmagnichivaniya raznoporistyh serdcevin cepochek granul fil'tr-matricy magnitnoho separatora. Vestnik MGSU, 9, 62–69.

*Рекомендовано до публікації д-р техн.наук Корнієнком Я. М.  
Дата надходження рукопису 24.04.2015*

**Дахненко Валерій Леонідович**, доцент, кандидат технічних наук, кафедра машин і апаратів хімічних та нафтопереробних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056  
E-mail: dvl2@meta.ua

УДК 621.317

DOI: 10.15587/2313-8416.2015.42631

## РОЗРОБКА НОВОГО АВТОМАТИЗОВАНОГО П'ЄЗОГРАВІМЕТРА АВІАЦІЙНОЇ ГРАВІМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ

© **О. М. Безвесільна, А. В. Коваль, А. Г. Ткачук, А. О. Захарова, О. Л. Галицький, Д. А. Статкевич**

*У статті розглянуто новий автоматизований п'єзографіметр авіаційної гравіметричної системи (АГС), який має більшу точність (1 мГал) та швидкодію (повністю автоматизований), ніж відомі на сьогоднішній день. Описано принцип дії п'єзографіметра, оснований на фізичному явищі прямого п'єзоефекту, та виведено його математичну модель. Встановлено, що шляхом підбору конструктивних параметрів чутливого елемента п'єзографіметра можна встановити його власну частоту 0.1 рад/с і уникнути необхідності використовувати фільтр низьких частот у складі автоматизованої АГС*

**Ключові слова:** п'єзографіметр, авіаційна гравіметрична система, прискорення сили тяжіння, п'єзоефект, чутливий елемент

*A new automated piezoelectric gravimeter of aviation gravimetric system (AGS), which has higher accuracy (1 mGal) and speed (fully automated) than known to date, is considered in this article. The principle of work of the piezoelectric gravimeter which based on the physical phenomenon of direct piezoelectric effect is described and its mathematical model is derived. It is established that by choosing the design parameters of the piezoelectric sensing element of piezoelectric gravimeter can set its own frequency of 0.1 rad / s and avoid the need for a low-pass filter in automated AGS*

**Keywords:** piezoelectric gravimeter, aviation gravimetric system, gravity, piezoelectric effect, sensor element

### 1. Вступ

Вивчення параметрів гравітаційного поля Землі (зокрема, її гравітаційних аномалій  $\Delta g$ ) необхідно в геодезії, геофізиці і геодинаміці. На сьогоднішній день інформація про гравітаційне поле Землі необхідна в авіаційній і космічній техніці (корекція систем інерціальної навігації ракет, літаків, орбіт космічних літальних апаратів), для дос-

лідження геодинамічних явищ, для реалізації цілей інженерної геології, археології, прогнозу землетрусів і т. д.

Гравіметричні вимірювання проводили на землі, на підводному човні, на надводному судні і на літальному апараті (ЛА).

Наземні вимірювання забезпечують найбільш високу точність (0.01 мГал). Однак, вони здійсню-