

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 obezhelezivanie 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'єзоелектру, 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'єзоелектр, 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 Δg) 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-

ються повільно. Райони полюсів, екватора, океанів для таких вимірювань недоступні. Морські вимірювання мають точність меншу, ніж наземні вимірювання (0.1–0.5 мГал). Однак, морські вимірювання неможливі у гірських та у віддалених районах океанів.

Вимірювання на ЛА дозволяють здійснювати вимірювання Δg у важкодоступних районах земної кулі зі швидкістю значно більшою, ніж наземні. Тому проведення високоточних авіаційних вимірювань є актуальним.

Для цих цілей використовують авіаційні гравіметричні системи (АГС), чутливим елементом яких є гравіметр [1].

Відомі й найбільш застосовні на сьогоднішній день наступні гравіметри: гравіметричний комплекс "ГРИН – 2000" (точність в умовах експлуатації на морських судах 0.1–0.2 мГал, на ЛА відповідно точність є нижчою); аероморський гравіметр "Чекан-АМ" (гранична похибка вимірів 1 мГал); гравіметр "ГИ 1/1" (похибка вимірювання прискорення сили тяжіння, без урахування похибки зовнішньої інформації: з морських носіїв: 0.3–0.5 мГал; з наземних носіїв: 0.2–0.3 мГал; з повітряних носіїв: 0.6 мГал).

Як зазначено вище, відомі морські гравіметри забезпечують точність (0.1...0.5) мГал, авіаційні – (0.6...1.0) мГал. Сьогодні така точність авіаційних гравіметрів недостатня.

2. Постановка завдання

Сьогодні існує багато гравіметрів АГС реально досяжна точність яких (0.6 ... 1.0) мГал. Перераховані гравіметри вимірюють разом із прискоренням сили тяжіння вертикальне прискорення \ddot{h} . Вимірювання \ddot{h} є складною науково-технічною проблемою і вимагає застосування додаткових фільтрів. Тому доцільною буде розробка нового автоматизованого п'єзогравіметра авіаційної гравіметричної системи.

3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єкт дослідження – автоматизований п'єзогравіметр авіаційної гравіметричної системи.

Метою статті є розробка нового автоматизованого п'єзогравіметра авіаційної гравіметричної системи.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Розглянути будову АГС та місце, яке у ній займає гравіметр.
2. Запропонувати конструкцію нового автоматизованого п'єзогравіметра авіаційної гравіметричної системи.
3. Розглянути фізичні принципи роботи нового автоматизованого п'єзогравіметра авіаційної гравіметричної системи.

4. Аналіз літературних даних

Проведені дослідження показали, що великий внесок у теорію і практику чутливих елементів АГС, датчиків кутової швидкості, систем стабілізації в СНД було зроблено рядом видатних учених: А. А. Одінцовим, Б. Б. Самотокіним, А. В. Збруцьким, М. А. Павловським, В. В. Карачуном, В. В. Чіковані та ін. [1, 2].

У роботі [3] запропоновано використовувати для аналізу роботи гіростабілізованих платформ на основі гіроскопів АГС метод кватерніонів.

У роботі [4] проведено аналіз рівняння руху АГС, чутливим елементом якої є гіроскопічний гравіметр. Узагальнено теорію і принципи побудови прецизійних гіроскопічних гравіметрів. Описано проведені експериментальні дослідження АГС з використанням гіроскопічного гравіметра з цифровою обробкою інформації.

У роботі [5] запропоновано використовувати МЕМС-технології в проектуванні сучасних гравіметрів.

У роботах [6, 7] описаний роботу п'єзоелектричного гіроскопа і принцип стеження за резонансною частотою. Досліджено залежність зміни резонансної частоти від впливу температури зовнішнього середовища.

5. Будова авіаційної гравіметричної системи

У роботі [1] отримано рівняння руху АГС:

$$f_z = g_z - \frac{v^2}{r} + 2e \frac{v^2}{r} \left[1 - 2\cos^2 \phi \cdot \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] - 2\omega_3 v \sin k \cos \phi + 2\dot{h} \frac{e}{r} v \cos k \sin 2\phi - 2 \frac{\gamma_0 \dot{h}}{r} - \omega_3^2 h \cos^2 \phi + \ddot{h},$$

де f_z – вихідний сигнал гравіметра; g_z – прискорення сили тяжіння вздовж осі чутливості гравіметра; v – швидкість ЛА; r – радіус місцезнаходження ЛА; e – стиск еліпсоїда; ϕ – географічна широта; k – курс ЛА; ω_3 – кутова швидкість обертання Землі; h – висота ЛА над еліпсоїдом; \dot{h} – вертикальна швидкість ЛА; \ddot{h} – вертикальне прискорення ЛА; γ_0 – довідкове ПСТ.

Усі члени рівняння, за винятком g_z , – перешкоди.

Аналіз рівняння руху АГС показує, що АГС має складатися із підсистем, які виконують такі функції: вимірюють ПСТ (п'єзогравіметр), стабілізують вісь чутливості ПГ у положення вертикалі, визначають координати місцезнаходження і швидкості, вимірюють висоту, здійснюють обчислювальні операції. Рівняння руху АГС можна представити функціональною схемою, зображеною на рис. 1.

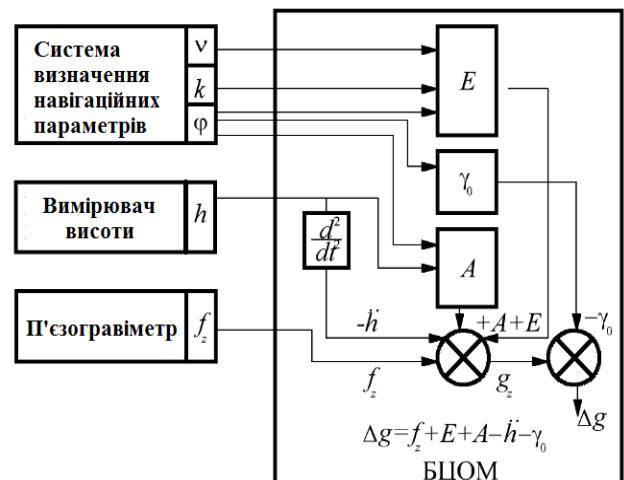


Рис. 1. Функціональна схема АГС

6. Конструкція та фізичні принципи роботи нового автоматизованого п'єзогравіметра авіаційної гравіметричної системи

Існують три основні типи конструкцій п'єзоелектричних перетворювачів прискорення: з деформацією п'єзоелемента стиснення-розтягування, здвигу та згину. Кожен із цих типів має як свої переваги, так і недоліки. Для вимірювання саме прискорення сили тяжіння g_z доцільно використовувати конструкцію п'єзогравіметра (ПГ) із деформацією п'єзоелемента типу стиснення-розтягування (рис. 2). П'єзоелемент являє собою багат шарову конструкцію (п'єзопакет), що складається з шарів кристалічного ніобіту літію з антипаралельною поляризацією і електродами, розділеними з'єднувальними шарами. Це можуть бути зварювальні шви, клейові шари або інші контактні з'єднання. Шари п'єзоелектричного елемента з'єднані електрично паралельно.

Принцип роботи ПГ з деформацією п'єзоелемента типу стиснення-розтягування пояснюється рис. 3. Спрощено, конструкцію ПГ (рис. 3, а) можна представити, як пристрій, що складається з жорстко зв'язаних (наприклад, склеєних) інерційного елемента 1, п'єзоелемента 2 і основи 3. Найпростіший механічний аналог такого ПГ може бути представлений у вигляді одноконтурної коливальної системи (рис. 3, б), що має одну ступінь свободи.

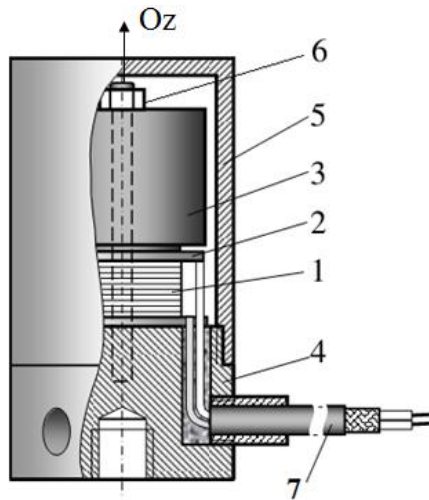


Рис. 2. Конструкція ПГ: 1 – п'єзоелемент; 2 – ізолятор; 3 – інерційний елемент (маса); 4 – основа; 5 – кришка; 6 – гвинт; 7 – кабель

Таке твердження є доцільним у випадку прийняття наступних раціональних припущень та умов:

- рух інерційного елемента розглядається в інерціальній системі відліку і відбувається тільки в одному напрямку – вздовж осі, перпендикулярної площині встановлення об'єкта дослідження;
- маса об'єкта дослідження приймається набагато більшою за масу датчика;
- основа, інерційний елемент і деталі, що служать для закріплення пружного елемента недемпфуючі;
- маса пружного елемента значно менша за масу інерційного елемента;
- у межах можливих коливань сила пружності пропорційна деформації пружного елемента;

– маса інерційного елемента, коефіцієнт пружності і коефіцієнт демпфування постійні, тобто не змінюються у часі.

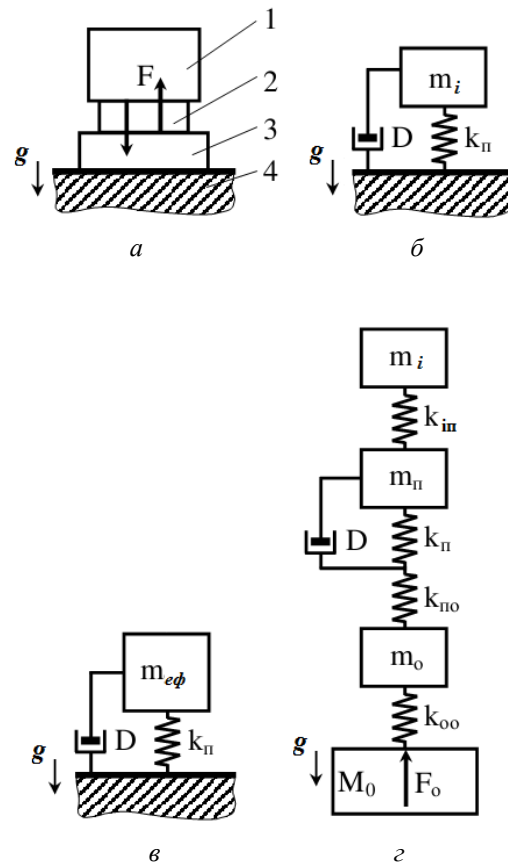


Рис. 3. Спрощена конструкція (а) і механічні аналоги (б-г) ПГ з деформацією стиснення-розтягування: 1 – інерційний елемент; 2 – п'єзоелемент; 3 – основа ПГ; 4 – об'єкт дослідження; m_i – маса інерційного елемента; k_{π} – коефіцієнт пружності п'єзоелемента; D – демпфер, що позначає внутрішні втрати у п'єзоелементі, k_{in} – коефіцієнт пружності між інерційним елементом та п'єзоелементом; k_{no} – коефіцієнт пружності між п'єзоелементом та основою; k_{oo} – коефіцієнт пружності між основою та об'єктом дослідження; M_0 – маса об'єкта дослідження

При гармонійному коливальному русі з прискоренням g_z на частотах ω значно менших від власної частоти ПГ ω_0 , можна вважати, що ПГ також здійснює синхронний коливальний рух. Сила реакції F , що діє з боку інерційного елемента на п'єзоелемент і викликає деформацію останнього, згідно з другим законом Ньютона $F = m_i g_z$, а, враховуючи синусоїдальний характер прискорення, $F = m_i g_z (\sin \omega t)$. Отже, генерований у результаті прямого п'єзоэффекту електричний заряд дорівнюватиме:

$$Q_{\pi} = d_{ij} F = d_{ij} m_i g_z (\sin \omega t),$$

де d_{ij} – п'єзоелектричний коефіцієнт (п'єзомодуль) п'єзоелемента, який описує його тип деформації.

Власна частота ПГ буде рівною:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{s_n E_n}{h_n m_i}}$$

де s_n , E_n , h_n – площа, модуль пружності матеріалу і висота п'єзоелемента, відповідно.

Таким чином, миттєве значення електричного сигналу (заряду або напруги) ПГ пропорційне миттєвому значенню g_z на частотах $\omega \ll \omega_0$ і нескінченно великому вхідному опорі вимірювального ланцюга.

При визначенні значення інерційної сили, необхідно мати на увазі не лише масу інерційного елемента, а й масу п'єзоелемента:

$$m_{\text{эф}} = m_i + 0.5m_n,$$

де $m_{\text{эф}}$ – ефективна маса, m_n – маса п'єзоелемента.

Це пояснюється тим, що якщо на умовно виділений нескінченно тонкий шар п'єзоелемента, прикріплений до інерційного елемента, діє сила $F_1 = m_i g$, то на такий же шар, прилеглий до основи, діє сила $F_2 = (m_i + m_n)g$. Тобто, деформація п'єзоелемента нерівномірна по його висоті. Заряд, генерований п'єзоелементом, визначається його усередненою деформацією від дії результуючої сили F_p :

$$F_p = 0.5(F_1 + F_2) = (m_i + 0.5m_n)g_z.$$

$$U_{\text{п}} = d_{ij} F = d_{ij} m_{\text{эф}} g_z / C,$$

де $U_{\text{п}}$, C – вихідна напруга та ємність п'єзоелемента відповідно.

Тоді власна частота ПГ буде рівною:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{s_n E_n}{h_n m_{\text{эф}}}}$$

В [1] показано, що при використанні низько-частотної фільтрації (яка необхідна у відомих авіаційних гравіметри) з частотою зрізу фільтра 0.1 рад/с, можна відокремлювати аномалії прискорення сили тяжіння від вертикального прискорення. Також, фільтр усуває у вихідному сигналі гравіметра компоненти інших збурень, частота яких вище 0.1 рад/с.

У запропонованому ПГ АГС за рахунок вибору геометричних параметрів і матеріалу п'єзоелемента можна встановити власну частоту ω_0 ПГ АГС рівною 0.1 рад/с і уникнути необхідності використання фільтра низьких частот.

7. Висновки

Обґрунтовано доцільність застосування п'єзоелектричного гравіметра авіаційної гравіметричної системи. Показано, що даний гравіметр має більшу точність у порівнянні з відомими авіаційними гравіметрами за рахунок підбору його частоти власних коливань, що дорівнює 0.1 рад/с. Розглянуто конструкція та фізичні принципи роботи п'єзоелектричного гравіметра.

Література

1. Безвесільна, О. М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри: Монографія [Текст] / О. М. Безвесільна. – Житомир: ЖДТУ, 2007. – 604 с.
2. Лозинская, А. М. Аэрогравиметрическая аппаратура на базе струнных датчиков [Текст] / А. М. Лозинская, З. П. Фомина, И. Л. Яшаев // Прикладная геофизика. – 1973. – № 70. – С. 175–185.
3. Tadano, S. Three Dimensional Gait Analysis Using Wearable Acceleration and Gyro Sensors Based on Quaternion Calculations [Text] / S. Tadano, R. Takeda, H. Miyagawa // Sensors. – 2013. – Vol. 13, Issue 7. – P. 9321–9343. doi: 10.3390/s130709321
4. Tkachuk, A. H. Corrected gyrocompass synthesis as a system with changeable structure for aviation gravimetric system with piezoelectric gravimeter [Text] / A. H. Tkachuk, E. N. Bezvesilnaya // Aviation. – 2014. – Vol. 18, Issue 3. – P. 134–140. doi: 10.3846/16487788.2014.969878
5. Dunzhu, X. The Development of Micromachined Gyroscope Structure and Circuitry Technology [Text] / X. Dunzhu, Y. Cheng, K. Lun // Sensors. – 2014. – Vol. 14, Issue 1. – P. 1394–1473. doi: 10.3390/s140101394
6. Singh, A. K. Piezoelectric Gyro Sensor Technology [Text] / A. K. Singh // Defence Science Journal. – 2007. – Vol. 57, Issue 1. – P. 95–103. doi: 10.14429/dsj.57.1735
7. Shiratori, N. Temperature Characteristic Compensation of a Miniature Bi-Axial Gyro-Sensor Using a Disk-Type Resonator [Text] / N. Shiratori, M. Hatakeyama, S. Okada // Japanese Journal of Applied Physics. – 1999. – Vol. 38, Issue 1. – P. 5586–5591. doi: 10.1143/JJAP.38.5586
8. Лунц, Я. Л. Введение в теорию гироскопов [Текст] / Я. Л. Лунц. – М.: Наука, 1972. – 296 с.
9. Попов, Е. И. Аппаратурные и опытно-методические работы по морской гравиметрии: Сборник статей [Текст] / Е. И. Попов. – М.: Наука, 1973. – 131 с.
10. Ткачев, Л. И. Системы инерциальной ориентировки. Ч. 1. Основные положения теории. [Текст] / Л. И. Ткачев. – М.: МЭИ, 1993. – 213 с.
11. Wilmoth, E. D. An investigation of methods for determining gravity anomalies from an aircraft [Text] / Sc. D. Thesis / E. D. Wilmoth. – Mass. Inst. of Tech, 1989. – 76 p.

References

1. Bezvesilna, O. M. (2007). Aviaciyni gravimetrychni systemy ta gravimetry: Monografiya. Zhytomyr: ZSTU, 604.
2. Lozinskaya, A. M. (1973) Aerogravimetrycheskaya apparatura na baze strunnyh datchikov. Prikladnaya geofizika, 70, 175–185.
3. Tadano, S., Takeda, R., Miyagawa, H. (2013). Three Dimensional Gait Analysis Using Wearable Acceleration and Gyro Sensors Based on Quaternion Calculations. Sensors, 13 (7), 9321–9343. doi: 10.3390/s130709321
4. Bezvesilnaya, E. N., Tkachuk, A. H. (2014). Corrected gyrocompass synthesis as a system with changeable structure for aviation gravimetric system with piezoelectric gravimeter. Aviation, 18 (3), 134–140. doi: 10.3846/16487788.2014.969878
5. Xia, D., Yu, C., Kong, L. (2014). The Development of Micromachined Gyroscope Structure and Circuitry Technology. Sensors, 14 (1), 1394–1473. doi: 10.3390/s140101394
6. Singh, A. K. (2007). English. DSJ, 57 (1), 95–103. doi: 10.14429/dsj.57.1735
7. Shiratori, N., Hatakeyama, M., Okada, S. (1999). Temperature Characteristic Compensation of a Miniature Bi-Axial Gyro-Sensor Using a Disk-Type Resonator. Jpn. J. Appl. Phys., 38 (Part 1, No. 9B), 5586–5591. doi: 10.1143/jjap.38.5586

8. Lunc, Ya. L. (1972). Vvedeniye v teoriyu giriskopov. Moscow: Nauka, 296.
9. Popov, Ye. I. (1973). Apparaturnye i opytno-metodicheskie raboty po morskoy gravimetrii: Sbornik statey. Moscow: Nauka, 131.

10. Tkachev, L. I. (1993). Sistemy inercialnoy orientirovki. Ch. 1. Osnovnye polozheniya teorii. Moscow: MEI, 213.
11. Wilmoth, E. D. (1989). An investigation of methods for determining gravity anomalies from an aircraft. Mass. Inst. of Tech, 76.

Дата надходження рукопису 21.04.2015

Безвесільна Олена Миколаївна, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України Кафедра приладобудування, Національний технічний університету України “Київський політехнічний університет”, пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

E-mail: bezvesilna@mail.ru

Коваль Антон Валерійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автоматизованого управління технологічними процесами та комп’ютерних технологій, Житомирський державний технологічний університет, вул. Черняхівського, 103, м. Житомир, Україна, 10005

E-mail: koval.anton@gmail.com

Ткачук Андрій Геннадійович, кандидат технічних наук, старший викладач, кафедра автоматизованого управління технологічними процесами та комп’ютерних технологій, Житомирський державний технологічний університет, вул. Черняхівського, 103, м. Житомир, Україна, 10005

E-mail: andrew_tkachuk@i.ua

Захарова Анна Олегівна, кафедра автоматизованого управління технологічними процесами та комп’ютерних технологій, Житомирський державний технологічний університет, вул. Черняхівського, 103, м. Житомир, Україна, 10005

E-mail: smallartt@gmail.com

Галицький Олександр Леонідович, кафедра автоматизованого управління технологічними процесами та комп’ютерних технологій, Житомирський державний технологічний університет, вул. Черняхівського, 103, м. Житомир, Україна, 10005

E-mail: andru_tkachuk@ukr.net

Статкевич Дмитро Андрійович, кафедра автоматизованого управління технологічними процесами та комп’ютерних технологій, Житомирський державний технологічний університет, вул. Черняхівського, 103, м. Житомир, Україна, 10005

E-mail: elan777@bigmir.net

УДК 519.651

DOI: 10.15587/2313-8416.2015.42632

ОБЧИСЛЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ОБ’ЄМНОЇ ТЕПЛОЄМНОСТІ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ПРОЦЕСІВ ПЛАВЛЕННЯ СПЛАВІВ

© Ю. В. Сидоренко, В. А. Третьяк

В статті розглянуто методи апроксимації функції залежності коефіцієнта об’ємної теплоємності від температури при моделюванні нагріву та плавлення сплавів. Використання наближених формул обумовлене складністю визначення коефіцієнта об’ємної теплоємності сплавів. Наведено результати розрахунків та приклади графіків, що отримані в результаті застосування різних формул апроксимації. Для забезпечення гнучкості пропонується використання апроксимації методом Гауса

Ключові слова: моделювання процесу плавлення-кристалізації, коефіцієнт об’ємної теплоємності, апроксимація

The article considers volumetric heat capacity approximation methods for heating at simulation of melting of alloys. Due to complexity of volume-specific heat capacity determination approximation should be used. The calculation data and graphic examples of different approximation methods are given. For more flexibility it is proposed to use Gauss method for approximation

Keywords: simulation of melting-crystallization process, volumetric heat capacity, approximation

1. Вступ

Процес плавлення є окремим випадком фазового переходу. Існує два загальних підходи до розв’язування задачі про фазовий перехід: з явним і неявним урахуванням межі розділу фаз (фронту). Перший підхід в англійській літературі називається задачею про фазовий перехід в постановці Стефана.

Другий підхід називають схемою наскрізного розрахунку, а в англійських статтях – задачею про фазовий перехід в ентальпійному формулюванні, оскільки рівняння ентальпії може бути зведене до нелінійного рівняння теплопровідності за рахунок визначення функції коефіцієнта об’ємної теплоємності з рівняння Кірхгофа [1]. Для цього необхідно виконати згладжу-