



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **111675** (13) **C2**  
(51) МПК (2016.01)**B22D 39/00****H05B 6/02** (2006.01)**H05B 6/06** (2006.01)**H05B 6/20** (2006.01)ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД**

<b>(21)</b> Номер заявки: <b>а 2015 02162</b>	<b>(72)</b> Винахідник(и): <b>Слажнєв Микола Андрійович (UA),</b> <b>Дубодєлов Віктор Іванович (UA),</b> <b>Богдан Кім Степанович (UA),</b> <b>Кізілова Анастасія Юріївна (UA)</b>
<b>(22)</b> Дата подання заявки: <b>12.03.2015</b>	
<b>(24)</b> Дата, з якої є чинними права на винахід: <b>25.05.2016</b>	
<b>(41)</b> Публікація відомостей про заявку: <b>27.07.2015, Бюл.№ 14</b>	<b>(73)</b> Власник(и): <b>ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ</b> <b>МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ НАЦІОНАЛЬНОЇ</b> <b>АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ,</b> бул. Вернадського, 34/1, м. Київ-142, 03680 (UA)
<b>(46)</b> Публікація відомостей про видачу патенту: <b>25.05.2016, Бюл.№ 10</b>	<b>(56)</b> Перелік документів, взятих до уваги експертизою: UA 65885 C2, 16.01.2006 SU 1246420 A1, 23.07.1986 SU 1334400 A2, 30.08.1987 SU 1091835 A, 23.03.1987 JP 08195276 A, 30.07.1996 GB 103645 A, 09.05.1918 US 4392786 A, 12.07.1983 Дубодєлов В. И. Исследование МГД процессов в расплавленном металле при течении в канале с гидравлическим разветвлением // Технічна електродинаміка. - № 5. - 1999. - С. 7 - 12 Меренков Ю. Ф., Егоров В. Д. Экспериментальное исследование трехфазного индукционного МГД-насоса с электромагнитной асимметрией // Тринадцатое рижское совещание по магнитной гидродинамике. - Саласпилс: 1990. - 51 - 52

**(54) МАГНІТОДИНАМІЧНИЙ СПОСІБ НАГРІВУ І РОЗЛИВАННЯ МЕТАЛЕВИХ РОЗПЛАВІВ****(57)** Реферат:

Винахід належить до ливарного виробництва. Магнітодинамічний спосіб нагріву і розливання металевих розплавів поєднує подачу розплаву у тигель МГД-установки, нагрів розплаву електричним струмом, індукованим щонайменше у трьох електрично та гідралічно зв'язаних між собою контурах, природну циркуляцію розплаву в каналах МГД-установки, дію на розплав електромагнітного поля, створення у розплаві додаткових електромагнітних сил, розливання розплаву під дією цих сил в один або декілька металоприймачів, при цьому у місці сполучення трьох горизонтальних каналів з вертикальним каналом створюють три вертикально направлені змінні електромагнітні сили ( $F_{em1}$ ,  $F_{em2}$ ,  $F_{em3}$ ), які мають кут зсуву фази відносно одна одної  $120^\circ$  ( $\Psi_1=0$ ;  $\Psi_2=2\pi/3$ ;  $\Psi_3=4\pi/3$ ), що є результатом взаємодії суперпозицій трьох змінних

UA 111675 C2

електричних струмів ( $I_1^*$ ,  $I_2^*$ ,  $I_3^*$ ), які мають кут зсуву фаз відносно один одного  $120^\circ$  ( $\Psi_{I_1}=0$ ;  $\Psi_{I_2}=2\pi/3$ ;  $\Psi_{I_3}=4\pi/3$ ), індукованих першим і другим індукторами ( $I_1^*=I_1+I_2$ ), другим і третім індукторами ( $I_2^*=I_1+I_3$ ) та третім і першим індукторами ( $I_3^*=I_3+I_1$ ) при увімкненні їх у трифазну електричну мережу за схемою "зірка" із трьома змінними магнітними полями ( $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ ), що також мають кут зсуву фаз відносно один одного  $120^\circ$  ( $\Psi_{B_1}=0$ ;  $\Psi_{B_2}=2\pi/3$ ;  $\Psi_{B_3}=4\pi/3$ ), та які створюють у міжполюсних зазорах триполюсного електромагніта, розташованого в одній площині з трьома горизонтальними каналами під кутом  $60^\circ$  до бокових суміжних горизонтальних каналів та під кутом  $180^\circ$  відносно третього при увімкненні його обмоток у трифазну електричну мережу за схемою "трикутник", суперпозиція яких утворює постійну, вертикально направлену електромагнітну силу:  $F_{em\Sigma}=1,5(I_m B_m)\cos\Psi$ , а суперпозиція знакозмінних складових, які не створюють електромагнітного тиску, дорівнює нулю або така що не перевищує 5 % від амплітудного значення пульсуючих електромагнітних сил.

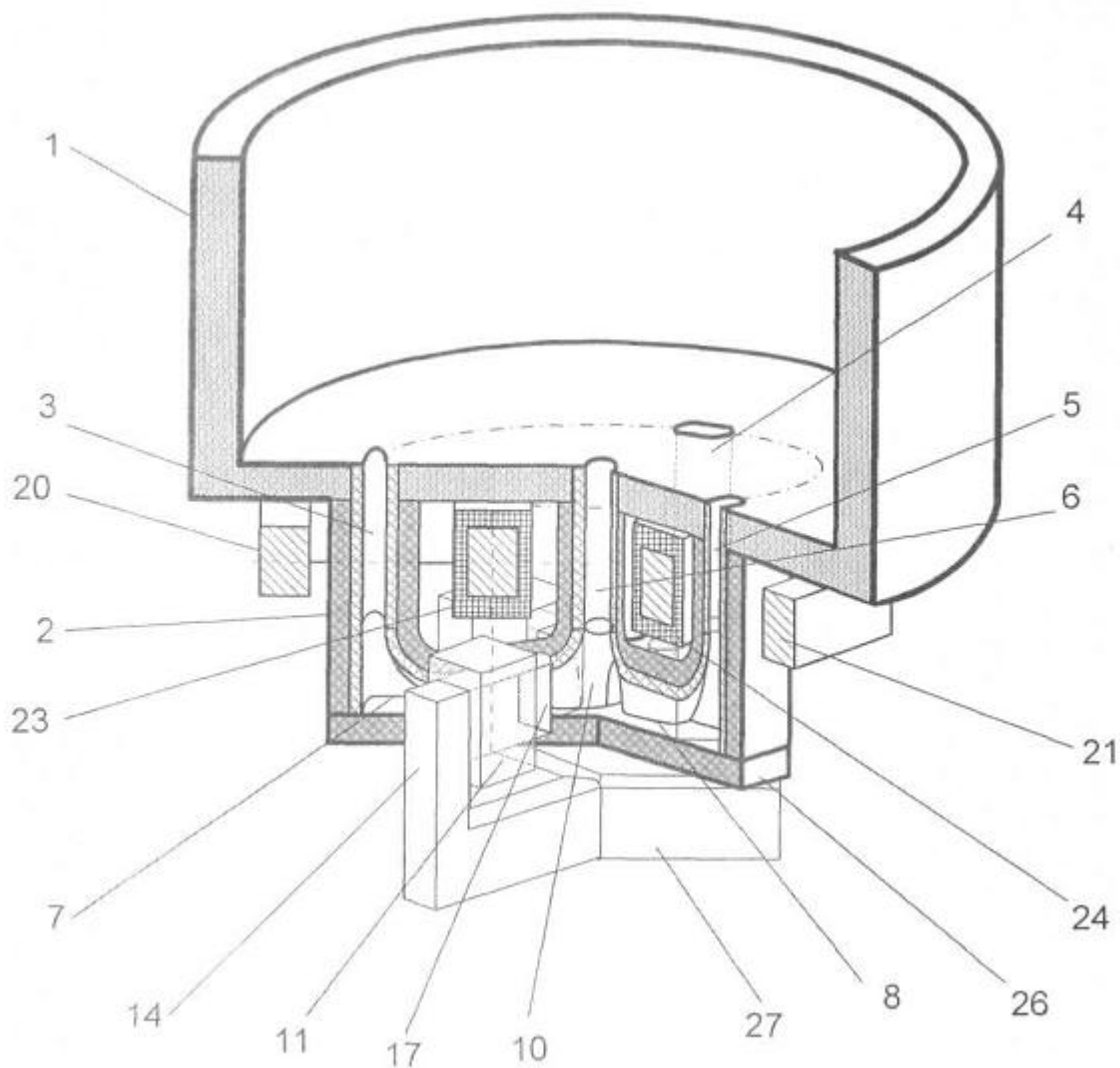


Fig. 1

Винахід належить до металургії та ливарного виробництва, зокрема для підігріву і розливання металевих розплавів за допомогою МГД-установок, у тому числі безперервного лиття заготовок, гравітаційного та лиття під низьким електромагнітним тиском.

Відомо спосіб нагріву та плавки металів у дво- і трифазних індукційних каналних печах, який забезпечує інтенсифікацію наявної циркуляції розплаву в каналах, зумовленої електродинамічними ефектами, та зниження в них його перегріву за рахунок спеціальних електричних схем підключення печей до трифазної електричної мережі (а.с. № 589695, МПКЗ H05B 5/10). Недоліком цього способу є обмежена можливість управління магнітодинамічними течіями розплаву в каналах, що не дає змогу забезпечити оптимальну гідродинаміку в таких печах при приготуванні та розливанні розплаву. Недоліком є те, що для розливки розплаву ці печі оснащуються електромеханічним або гідравлічним механізмами, які мають значну інерційність, що зменшує можливість точного дозування розплаву. При цьому збільшуються витрати металу, а отже зростає собівартість ливарної продукції.

Відомо також спосіб розливання розплавів з двох індукторних магнітодинамічних установок, який поєднує індуктування в каналах з розплавом електричного струму і дію на розплав додаткового магнітного поля. При цьому електричний струм забезпечує нагрів розплаву в каналах, а при взаємодії його з зовнішнім магнітним полем в розплаві створюються додаткові електромагнітні сили, під дією яких здійснюється управління течією розплаву в каналах і передача тепла із каналів в ванну печі, а також його розливання (Магнітодинамические насосы для жидких металлов. Наукова думка. - Киев. - 1989. - С. 27-28). Недоліком цього способу є обмежена можливість управління течією розплаву в каналах і тепломасообміном між каналами і ванною, особливо при безперервних процесах розливання металу.

Найбільш близьким аналогом до запропонованого винаходу щодо технічної суті і досягнутого результату є магнітодинамічний спосіб нагріву і розливання рідких металів (UA № 65885 МПК (2006) H05B 6/02, 6/20, опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1), який поєднує подачу в ванну установки розплавленого металу з відомими властивостями, нагрів розплаву електричним струмом, індуктованим щонайменше в трьох електрично і гідравлічно зв'язаних між собою контурах, утворених з індукційних каналів, з'єднаних з ванною і замкнених навколо обмоток індукторів, природну циркуляцію металу в каналах, дію на метал магнітного поля, створення в металі додаткових електромагнітних сил, розливання розплаву під дією цих сил в один або декілька металоприймачів, причому в хрестоподібних взаємно перпендикулярних розгалуженнях індукційних каналів в розплаві створюють протилежно направлені електромагнітні сили, одну з яких спрямовують у бік ванни і використовують для керування тепломасообміном між каналами і ванною при нагріві металу, а другу спрямовують в бік зливного носка, діють на розплав періодично або безперервно і регулюють нею витрату металу відповідно до технології його розливання. Недоліком цього способу є складність його реалізації та неможливість створення умов для рівномірного навантаження фаз трифазної електричної мережі.

В основу запропонованого винаходу поставлена задача підвищення ефективності процесу нагріву і розливання металевих розплавів за допомогою МГД-установок, підвищення електромагнітного тиску, забезпечення можливості незалежного управління розливанням металевих розплавів та його нагріванням у каналах і тиглі, здійснення керованого та різноконтурного тепло- та масообміну між каналами і тиглем, реалізація додаткового керованого тепло- та масообміну у рідкому металі безпосередньо у тиглі, створення умов рівномірного навантаження трифазної електромережі при функціонуванні систем генерування індукційного струму та електромагнітного поля.

Поставлена задача вирішується тим, що запропонований магнітодинамічний спосіб нагріву і розливання металевих розплавів з відомими фізико-хімічними характеристиками, який поєднує подачу розплаву у тигель МГД-установки, нагрів розплаву електричним струмом, індуктованим щонайменше у трьох електрично та гідравлічно зв'язаних між собою контурах, природну циркуляцію розплаву в каналах МГД-установки, дію на розплав електромагнітного поля, створення у розплаві додаткових електромагнітних сил, розливання розплаву під дією цих сил в один або декілька металоприймачів передбачає те, що, відповідно до запропонованого винаходу, у місці сполучення трьох горизонтальних каналів з вертикальним створюють три вертикально направлені змінні електромагнітні сили ( $F_{em1}$ ,  $F_{em2}$ ,  $F_{em3}$ ), які мають кут зсуву фази відносно одна одної  $120^\circ$  ( $\Psi_1=0$ ;  $\Psi_2=2\pi/3$ ;  $\Psi_3=4\pi/3$ ), що є результатом взаємодії суперпозиції трьох змінних електричних струмів ( $I_1^*$ ,  $I_2^*$ ,  $I_3^*$ ), які мають кут зсуву фаз відносно один одного  $120^\circ$  ( $\Psi_1=0$ ;  $\Psi_2=2\pi/3$ ;  $\Psi_3=4\pi/3$ ), індуктованих першим і другим індукторами ( $I_1^*=I_1+I_2$ ), другим і третім індукторами ( $I_2^*=I_2+I_3$ ) та третім і першим індукторами ( $I_3^*=I_3+I_1$ ) при увімкненні їх у трифазну електричну мережу за схемою "зірка" із трьома змінними магнітними полями ( $B_1$ ,  $B_2$ ,

$B_3$ ), що також мають кут зсуву фаз відносно один одного  $120^\circ$  ( $\Psi_{B1}=0$ ;  $\Psi_{B2}=2\pi/3$ ;  $\Psi_{B3}=4\pi/3$ ), та які створюють у міжполюсних зазорах триполюсного електромагніта, розташованого в одній площині з трьома горизонтальними каналами під кутом  $60^\circ$  до бокових суміжних горизонтальних каналів та під кутом  $180^\circ$  відносно третього при увімкненні його обмоток у трифазну електричну мережу за схемою "трикутник", суперпозиція яких утворює постійну, вертикально направлену електромагнітну силу

$$F_{em\Sigma}=1,5(I_m B_m)\cos\Psi,$$

а суперпозиція знакозмінних складових, які не створюють електромагнітного тиску, дорівнює нулю (або така що не перевищує 5 % від амплітудного значення пульсуючих електромагнітних сил).

Для пояснення запропонованого винаходу на фіг. 1 наведено загальний вигляд МГД-установки, на якій реалізовано запропонований магнітодинамічний спосіб нагріву і розливання металевих розплавів.

На фіг. 2а показано вигляд знизу на цю установку зі знятою нижньою кришкою та з від'єднаними магнітопроводами електромагніта, де відповідно до запропонованого винаходу виконано сполучення трьох горизонтальних каналів під кутом один до одного  $120^\circ$ , внаслідок чого утворюється строєний горизонтальний канал та строєна робоча зона, та пояснюється її сполучення із вертикальним каналом під кутом  $90^\circ$ .

На фіг. 2б показано "вигляд знизу" статичної схеми утворення суперпозиції (алгебраїчної суми) об'ємних електромагнітних сил ( $F_{em\Sigma}$ ), що мають результируючий напрямок вектора - "від нас", у результаті взаємодії трьох змінних електричних струмів ( $I_1^*$ ,  $I_2^*$ ,  $I_3^*$ ) із трьома змінними та перпендикулярно направленими до відповідних електричних струмів магнітними полями ( $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ ) за період часу (у статичі), що складає  $2\pi$ .

На фіг. 3 показана динамічна (у часі) схема чергування процесу генерування вертикально направлених електромагнітних сил: - фіг. 3а –  $F_{em1}$ ; фіг. 3б –  $F_{em2}$ ; фіг. 3в –  $F_{em3}$ , за проміжки часу  $t = \frac{\pi}{2} + \psi_i$ , що дорівнюють  $\frac{1}{3}$  періоду ( $T_i = \frac{2}{3}\pi = \psi_i$ ).

На фіг. 4. графічно показана суперпозиція ( $F_{em2}(t)$ ) трьох пульсуючих одно направлених електромагнітних сил ( $F_{em1}(t)$ ,  $F_{em2}(t)$ ,  $F_{em3}(t)$ ), що генеруються у строєній робочій зоні та мають кут зсуву фаз одна відносно одної  $120^\circ$  ( $\Psi_1=0$ ;  $\Psi_2=2\pi/3$ ;  $\Psi_3=4\pi/3$ ).

Нумерація позицій на фіг. 1 та фіг. 2 загальна.

Тигель 1, з'єднаний із вертикальним строєним індукційним каналом 2, який складається із трьох індукційних каналів 3, 4 та 5, розташованих у вертикальній площині і з'єднаних одним центральним вертикальним каналом 6 під кутом  $120^\circ$  один відносно одного. Трубопровід центрального каналу 6 та три трубопроводи бокових каналів 3, 4 та 5 сполучені з тиглем 1 під прямим кутом. У нижній частині трубопроводи бокових каналів 3, 4 та 5 та трубопровід центрального каналу 6 сполучені трьома горизонтальними каналами 7, 8 та 9 з'єднаними під кутом  $120^\circ$  у горизонтальній площині один відносно одного, та із центральним каналом 6 під кутом  $90^\circ$  у вертикальній площині.

На ділянці сполучення трьох горизонтальних каналів 7, 8 та 9 із вертикальним центральним каналом 6 утворюється трипроменева строєна трійникова робоча зона 10.

- 3 трьох сторін до медіани кута сполучення горизонтальних каналів 7, 8 та 9 трипроменевої строєної трійникової робочої зони 10 розташовані три полюси електромагніта 11, 12 та 13, магнітопроводами 14, 15 та 16 із обмотками 17, 18 та 19 на кожному з них. Кут розташування полюсів електромагніта відносно суміжних горизонтальних каналів відповідно складає по  $60^\circ$ , та  $180^\circ$  до третього каналу.

Три індукційні канали 3, 4 та 5 у свою чергу охоплені трьома магнітопроводами 20, 21 та 22 із індукторами 23, 24 та 25.

Магнітодинамічна установка, на якій реалізовано запропонований спосіб, працює наступним чином. При запуску установки у роботу в тигель 1 заливають металевий розплав, який заповнює порожнину тигля 1, канали 3, 4, 5, 6 у індукційному каналі 2, порожнину у горизонтальних каналах 7, 8, 9 та простір робочої зони 10. Навколо обмоток індукторів 23, 24 і 25 з магнітопроводами 20, 21 і 22 утворюються короткозамкнуті рідкометалеві витки. При увімкненні обмоток індукторів 23, 24, 25 в електричну мережу промислової частоти у коротко замкнутих рідкометалевих витках індукується електричний струм, під дією якого відбувається нагрівання розплаву у каналах. При цьому тепло із каналів передається у тигель і за рахунок створення направленої течії розплаву у каналах. Для цього обмотки індукторів 23, 24 і 25 вмикають до електричного джерела живлення трифазного струму по схемі "зірка" чи "трикутник", що дає змогу здійснити як залежне симетричне, так і незалежне несиметричне регулювання напруги та

послідовності фаз живлення в залежності від режиму нагрівання та перемішування розплаву в каналах установки.

Для створення направленої циркуляції розплаву в каналах на обмотки електромагніта 17, 18 та 19 подають напругу так, щоб електромагнітна сила створювала течію у вертикальному центральному каналі 6 із робочої зони 10 та із приєднаних до неї бокових горизонтальних каналів 7, 8 та 9, які у свою чергу гідравлічно з'єднані із каналами 3, 4 та 5 у бік тигля 1. При цьому між тиглем 1 і каналами 3, 4, 5 виникають циркуляційні потоки, що виносять перегрітий у індукційному каналі метал до порожнини тигля 1. В результаті у тиглі 1 виникають додаткові циркуляційні потоки, що сприяє усередненню температури та хімічного складу розплаву.

Згідно з запропонованим способом, при увімкненні обмоток триполюсного електромагніта у трифазну мережу, наприклад за схемою "трикутник", у магнітопроводах 14, 15 і 16 утворюються три магнітні потоки  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  і  $\Phi_3$ , які мають зсув по фазі  $120^\circ$  і замикаються у місці сполучення магнітопроводу та міжполюсному просторі електромагніта, індукуючи магнітні поля відповідно  $B_1$ ,  $B_2$  і  $B_3$ , які так само як і полюси електромагніта 11, 12 і 13, спрямовані під кутом  $90^\circ$  до центрального вертикального каналу 6 і розташовані горизонтально з трьох боків під кутом  $60^\circ$  відносно бокових горизонтальних каналів 7, 8, 9.

У цьому випадку у строєній трійниковій робочій зоні 10 при взаємодії взаємно перпендикулярних горизонтальних складових електричних струмів  $I_1^*$ ,  $I_2^*$ ,  $I_3^*$  з магнітними полями  $B_1$ ,  $B_2$  та  $B_3$  утворюються три пульсуючі вертикально спрямовані електромагнітні сили –  $F_{em1}$ ,  $F_{em2}$ ,  $F_{em3}$ , що у з огляду на динаміку (у часі) чергуються за проміжки часу  $t = \frac{\pi}{2} + \psi_i$ , що дорівнюють  $\frac{1}{3}$  періоду ( $T_i = \frac{2}{3}\pi = \psi_i$ ).

Так, у момент часу  $t = \frac{\pi}{2}$  (фіг. 3а) електричний струм  $I_1^*(t) = (I_1 + I_2)\sin(\omega t)$ , що індукується першим та другим індукторами, взаємодіє із магнітним полем  $B_1(t) = B_1 \sin(\omega t + \varphi)$ , яке індукується у міжполюсному зазорі між першим полюсом електромагніта та замикається на протилежні третій та другий полюси електромагніта. У зоні перетинання силових ліній магнітного поля та електричного струму виникає об'ємна електромагнітна сила  $F_{em1}(t) = I_1^* \cdot \sin(\omega t) \cdot (B_1 \sin(\omega t + \varphi))$ .

У момент часу  $t = \frac{\pi}{2} + \frac{2}{3}\pi$  (фіг. 3б), електричний струм  $I_2^*(t) = (I_2 + I_3)\sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi)$ , що індукується другим та третім індукторами, взаємодіє із магнітним полем  $B_2(t) = B_2 \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \varphi)$ , яке індукується у міжполюсному зазорі між другим полюсом електромагніта та замикається на протилежні перший та третій полюси електромагніта. У зоні перетинання силових ліній магнітного поля та електричного струму виникає об'ємна електромагнітна сила  $F_{em2}(t) = I_2^* \cdot \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \cdot (B_2 \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \varphi))$ .

У момент часу  $t = \frac{\pi}{2} + \frac{4}{3}\pi$  (фіг. 3в) електричний струм  $I_3^*(t) = (I_3 + I_1)\sin(\omega t + \frac{4}{3}\pi)$ , що індукується третім та першим індукторами, взаємодіє із магнітним полем  $B_3(t) = B_3 \sin(\omega t + \frac{4}{3}\pi + \varphi)$ , яке індукується у міжполюсному зазорі між третім полюсом електромагніта та замикається на протилежні другий та перший полюси електромагніта. У зоні перетинання силових ліній магнітного поля та електричного струму виникає об'ємна електромагнітна сила  $F_{em3}(t) = I_3^* \cdot \sin(\omega t + \frac{4}{3}\pi) \cdot (B_3 \sin(\omega t + \frac{4}{3}\pi + \varphi))$ .

В подальшому знак амплітудних значень електричного струму та магнітного поля змінюється на протилежний, а процес почергового генерування вертикально направлених електромагнітних сил повторюється у циклі  $2\pi$ ,  $4\pi$ , і т.д.

На фіг. 4. графічно показана суперпозиція ( $F_{em2}(t)$ ) трьох пульсуючих однонаправлених електромагнітних сил ( $F_{em1}(t)$ ,  $F_{em2}(t)$ ,  $F_{em3}(t)$ ), що генеруються у строєній робочій зоні та мають кут зсуву фаз одна відносно одної  $120^\circ$  ( $\Psi_1=0$ ;  $\Psi_2=2\pi/3$ ;  $\Psi_3=4\pi/3$ ).

При цьому кожна з пульсуючих електромагнітних сил з амплітудним значенням, що дорівнює "1", складається із 50 % складової, що створює тиск ( $0,5 \cdot I_i \cdot B_i \cos(\varphi)$ ), та вібраційної складової, що не створює тиск ( $0,5 \cdot I_i \cdot B_i \cos(2\omega t + 2\psi_i + \varphi)$ ), та здійснює вібраційну дію на розплав із подвоєною частотою ( $2\omega t = 2\pi f t$ ) змінного струму електричної мережі (інші 50 % від амплітудного значення).

$$F_{em1}(t) = 0,5 \cdot I_1 \cdot B_1 \cdot \cos(\varphi) - 0,5 \cdot I_1 \cdot B_1 \cdot \cos(2\omega t + \varphi);$$

$$F_{em2}(t) = 0,5 \cdot I_2 \cdot B_2 \cdot \cos(\varphi) - 0,5 \cdot I_2 \cdot B_2 \cdot \cos(2\omega t + 4\pi/3 + \varphi);$$

$$F_{em3}(t) = 0,5 \cdot I_3 \cdot B_3 \cdot \cos(\varphi) - 0,5 \cdot I_3 \cdot B_3 \cdot \cos(2\omega t + 8\pi/3 + \varphi).$$

Суперпозиція ( $F_{em\Sigma}$ ) трьох пульсуючих, однонаправлених електромагнітних сил ( $F_{em1}$ ,  $F_{em2}$ ,  $F_{em3}$ ), відповідно до запропонованого способу, потроєє складову, що створює тиск

$(3 \cdot 0,5 \cdot I_B \cos(\varphi))$ , а вібраційні складові, що не створюють тиск, за рахунок існуючого у них подвоєного кута зсуву фаз відносно одна одної ( $2\psi_i=0, 4\pi/3, 8\pi/3$ ), при складанні взаємознищуються, та їх суперпозиція дорівнює нулю.

$$F_{em2}=F_{em1}+F_{em2}+F_{em3}=1,5 \cdot (I_m \cdot B_m) \cdot \cos(\varphi).$$

5 Обмотки індукторів та електромагніта магнітодинамічної установки, на якій реалізовано запропонований спосіб, також можуть вмикатися у режими, при яких електромагнітні сили  $F_{em1}$ ,  $F_{em2}$  та  $F_{em3}$  можуть мати різний напрямок відносно одна до одної, що дозволяє створювати примусову циркуляцію розплаву у тиглі 1 та каналах магнітодинамічної установки так, що розплав буде всмоктуватися із двох бокових та центрального каналу і видаватися із одного бокового каналу і т.п. Це дає змогу розташовувати роздавальний металопровід на одному із бокових каналів та створити умови підвищення масової витрати.

Зокрема, при створенні електромагнітних сил  $F_{em1}$ ,  $F_{em2}$  та  $F_{em3}$  у запропонованому індукційному каналі 2 використовуються три електричні та гідравлічні контури та три магнітних поля. Така установка завдяки запропонованому способу може працювати у режимах з вмиканням одного, двох чи трьох індукторів та однієї, двох чи трьох обмоток електромагніта для створення нагрівання, перемішування чи розливання рідких металевих розплавів, що запобігає виникненню аварійних ситуацій при твердненні розплаву у каналах в результаті зникнення напруги на одній або двох фазах трифазної промислової електричної мережі та може здійснювати електромагнітне кероване розливання розплаву.

20 Додатково, за рахунок того, що індуктори магнітодинамічної установки вмикаються у трифазну промислову мережу, а їх магнітопроводи встановлені в одній площині із тиглем, у донній частині тигля 1 утворюється магнітне поле, що біжить, яке при взаємодії з рідким металом у тиглі 1 приводить до його циркуляційного обертального руху у напрямку чергування фаз, якими живляться індуктори.

25 Додатково, за рахунок того, що електричні та гідравлічні контури, зокрема на ділянці створення електромагнітних сил ( $F_{em1}(t)$ ,  $F_{em2}(t)$ ,  $F_{em3}(t)$ ), у строєному горизонтальному каналі утворюють умови перегинання напрямку протікання змінних електричних струмів ( $I_1^*$ ,  $I_2^*$ ,  $I_3^*$ ) на кут  $120^\circ$ , що дозволяє перерозподілити щільність струму ближче до кута перегину каналу та ближче до відповідного полюсу електромагніта у медіані кута перегинання. Це дає змогу підвищити ефективність взаємодії зовнішнього магнітного поля з електричним струмом за рахунок зменшення негативного впливу дисипації електромагнітного поля у рідкометалевому провіднику, що обмежується глибиною проникнення електромагнітних хвиль, особливо при використанні частоти струму понад 50 Гц. У такому разі ефективність магнітодинамічного способу створення електромагнітних сил може бути підвищена, а залежність цього процесу від частоти струму зменшена. Це дає змогу ефективно використовувати магнітодинамічну установку при живленні її електромагнітних систем електричним струмом із частотою 60 Гц та вище (до 500 Гц).

35 Запропонований спосіб успішно пройшов апробацію на фізичній моделі установки із реальними електромагнітними системами індуктування електричних струмів та магнітних полів, та комп'ютерній фізичній моделі, на базі еквівалентної електричної схеми із використанням програми моделювання «simulink model Matlab 7.0».

40 Таким чином, запропонований магнітодинамічний спосіб нагріву і розливання металевих розплавів, на відміну від найближчого аналога та інших аналогів, дає змогу одержати новий технічний результат, виражений у забезпеченні можливості незалежного управління нагрівом металу у каналах та тиглі установки, тепло- та масообміном між каналами та тиглем, створення умов рівномірного навантаження трифазної електромережі системами індукційного нагріву, потроєне підвищення електромагнітного тиску. Крім того, запропонований спосіб дає змогу суттєво знизити споживання електроенергії установкою, що позитивно впливає на собівартість ливарної продукції.

50

#### ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Магнітодинамічний спосіб нагріву і розливання металевих розплавів з відомими фізико-хімічними властивостями, який поєднує подачу розплаву у тигель МГД-установки, нагріву розплаву електричним струмом, індуктованим щонайменше у трьох електрично та гідравлічно зв'язаних між собою контурах, природну циркуляцію розплаву в каналах МГД-установки, дію на розплав електромагнітного поля, створення у розплаві додаткових електромагнітних сил, розливання розплаву під дією цих сил в один або декілька металоприймачів, який **відрізняється** тим, що у місці сполучення трьох горизонтальних каналів з вертикальним каналом створюють три вертикально направлені змінні електромагнітні сили -  $F_{em1}$ ,  $F_{em2}$ ,  $F_{em3}$ ,

- які мають кут зсуву фази відносно одна одної  $120^\circ$ :  $\Psi_1=0$ ,  $\Psi_2=2\pi/3$ ,  $\Psi_3=4\pi/3$ , що є результатом взаємодії суперпозицій трьох змінних електричних струмів -  $I_1^*$ ,  $I_2^*$ ,  $I_3^*$ , які мають кут зсуву фаз відносно один одного  $120^\circ$ :  $\Psi_{I1}=0$ ,  $\Psi_{I2}=2\pi/3$ ,  $\Psi_{I3}=4\pi/3$ , індукованих першим і другим індукторами  $I_1^*=I_1+I_2$ , другим і третім індукторами  $I_2^*=I_1+I_3$  та третім і першим індукторами  $I_3^*=I_3+I_1$  при увімкненні їх у трифазну електричну мережу за схемою "зірка" із трьома змінними магнітними полями, а саме:  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ , що також мають кут зсуву фаз відносно один одного  $120^\circ$ :  $\Psi_{B1}=0$ ,  $\Psi_{B2}=2\pi/3$ ,  $\Psi_{B3}=4\pi/3$ , та які створюють у міжполюсних зазорах триполюсного електромагніта, розташованого в одній площині з трьома горизонтальними каналами під кутом  $60^\circ$  до бокових суміжних горизонтальних каналів та під кутом  $180^\circ$  відносно третього при увімкненні його обмоток у трифазну електричну мережу за схемою "трикутник", суперпозиція яких утворює постійну вертикально направлену електромагнітну силу
- $F_{em\Sigma}=1,5(I_m B_m)\cos\Psi$ ,
- а суперпозиція знакозмінних складових, які не створюють електромагнітного тиску, дорівнює нулю або така, що не перевищує 5 % від амплітудного значення пульсуючих електромагнітних сил.

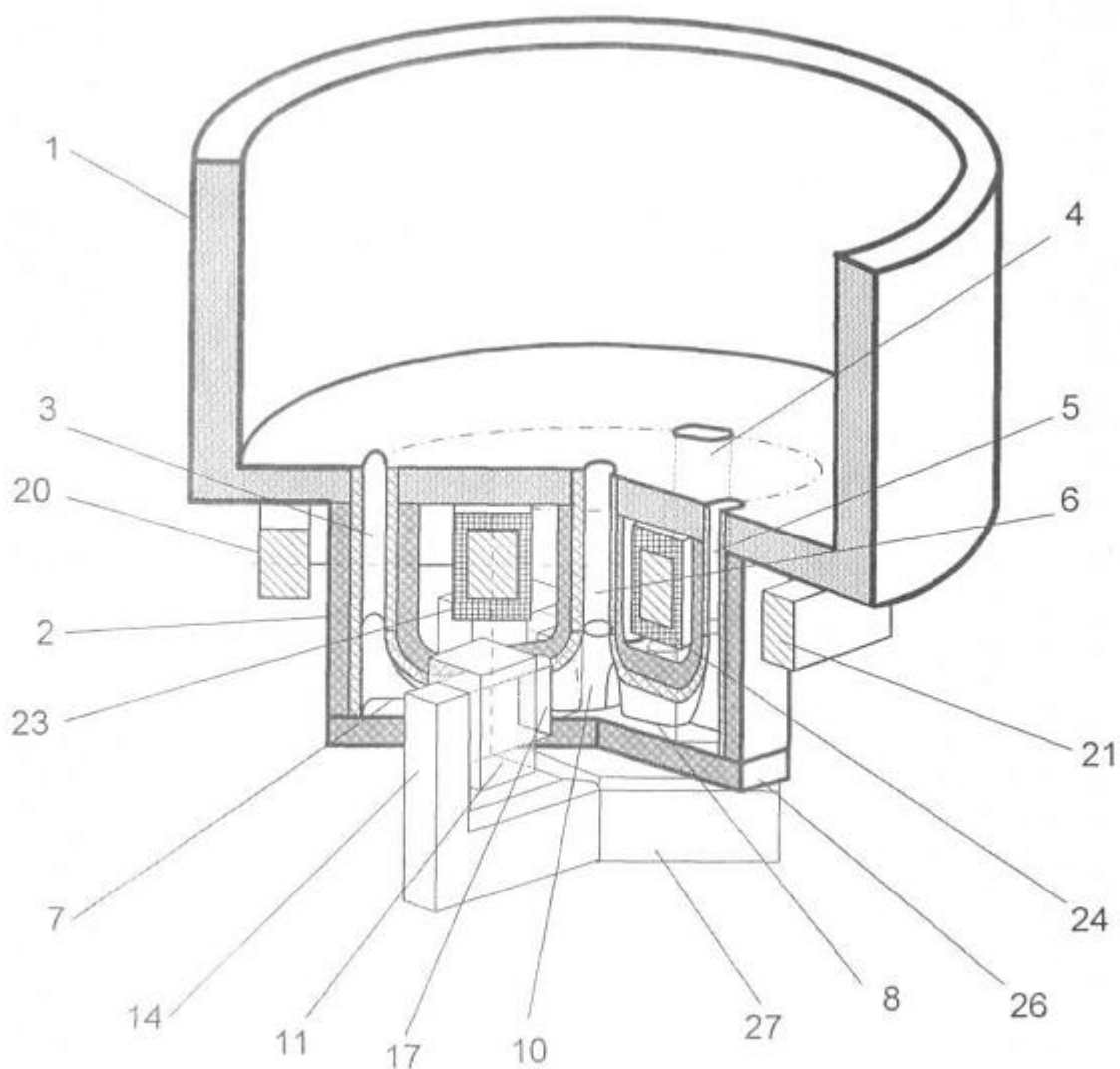
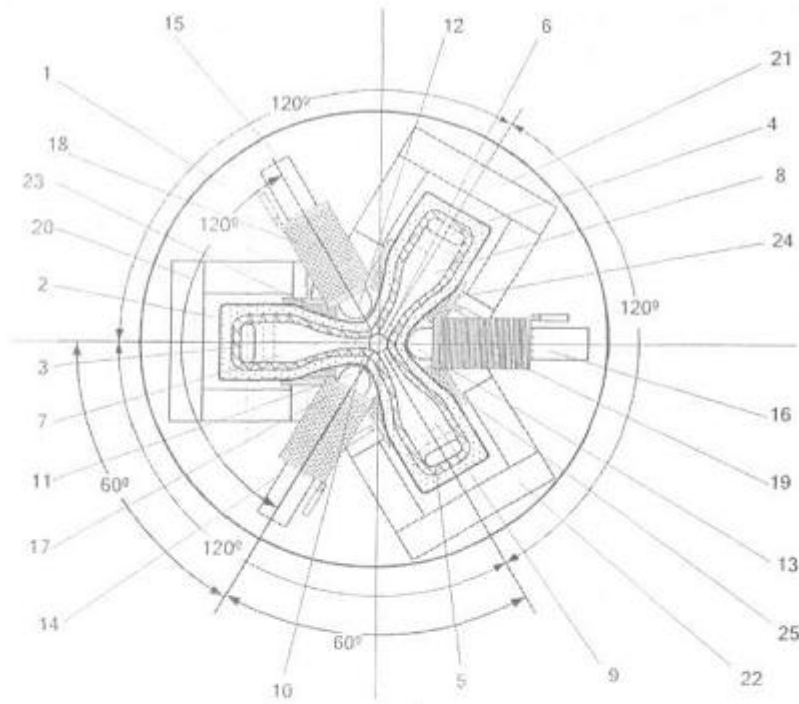
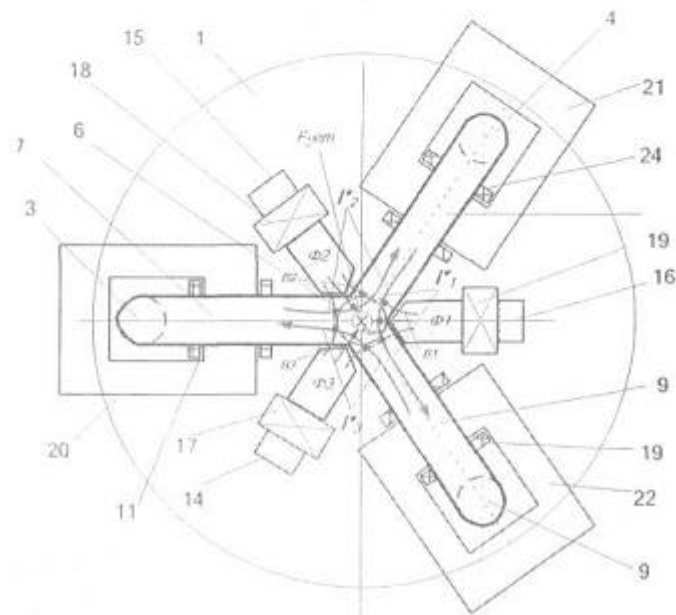


Fig. 1



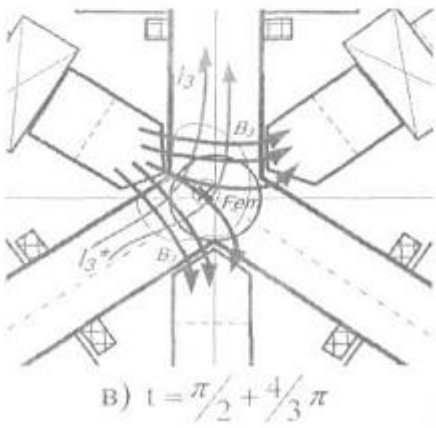
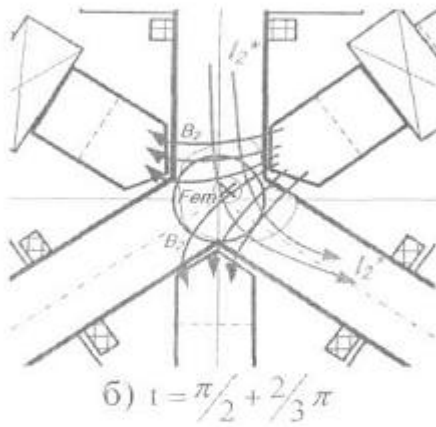
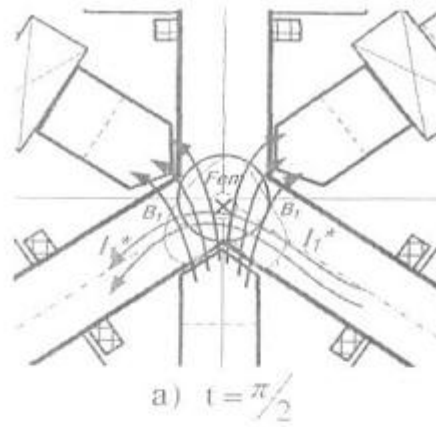
a)



b)

Фиг. 2





Фиг. 3

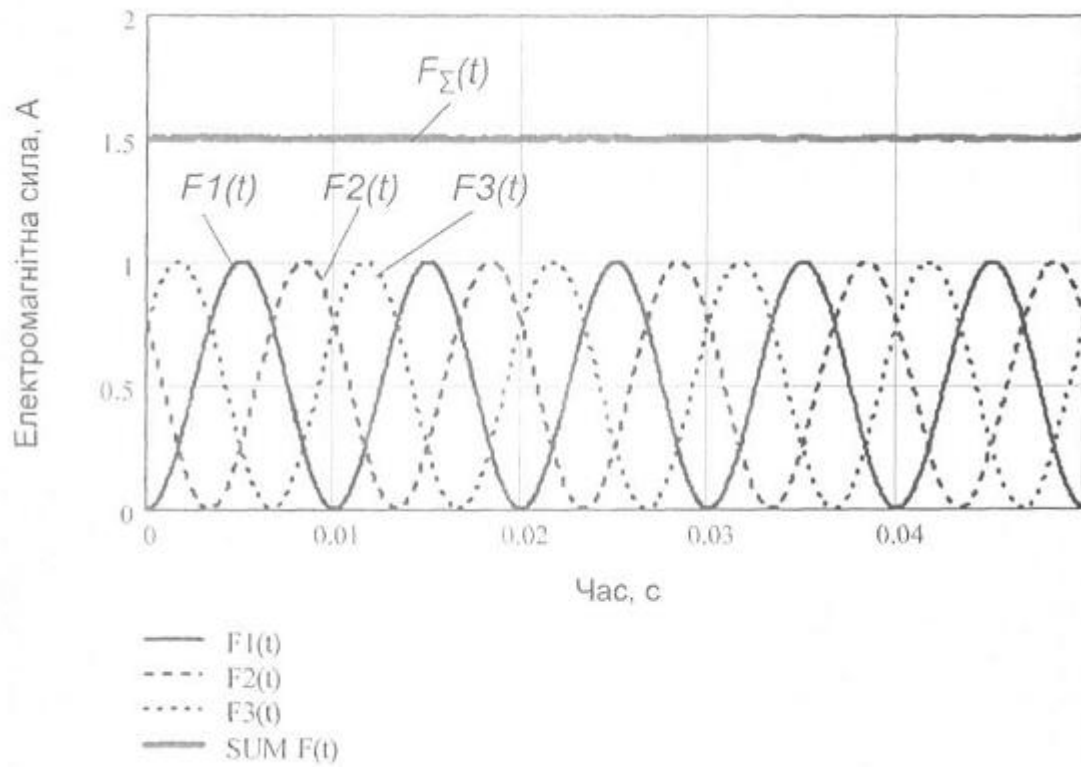


Fig. 4