

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Цибрій Юрій Олександрович

УДК 681.521: 62-278:621.745

ДИСЕРТАЦІЯ

Механотронна система керування випларкою титану

05.02.02 – машинознавство

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Ю.О. Цибрій

Науковий керівник Грабовський Георгій Геннадійович, доктор технічних наук,
професор

АНОТАЦІЯ

Цибрій Ю.О. Механотронна система керування виплавою титану. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.02 – Машинознавство. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2018.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-практичної задачі розробки механотронної системи керування виплавою титанових зливків електронно-променевою плавкою, яка забезпечує підвищення ефективності роботи електронно-променевої установки завдяки ресурсо- та енергозбереженню при високій якості готових титанових зливків.

В Україні промислове виробництво високоякісних титанових зливків пов'язане з вакуумно-дуговою, електрошлаковою, плазмовою та електронно-променевою плавкою. Остання вважається найбільш прогресивною технологією, завдяки високій степені очищення зливку від домішок, відсутності жорстких вимог по хімічному та фізичному складу шихтового матеріалу та можливість активного втручання в технологічний процес. Однак електронно-променева плавка має недостатньо високу продуктивність та є однією з найбільш енергозатратних. Через відсутність вимірювання температури титанового розплаву в проміжній ємності процес плавки суттєво залежить від вибору режиму обігріву оператором. Крім того, при витягуванні зливку з кристалізатора на його поверхні утворюються різноманітні дефекти, для усунення яких при обробці зливку втрачається до 10% його маси.

Загальною причиною вищевказаних недоліків є неузгодженість керування процесом плавки, витягування зливку та подачі шихти в зону плавки. Тому розробка механотронної системи керування виплавою титану при електронно-променевій плавці, яка узгоджує керування процесами виготовлення титанових зливків та підвищує їх ефективність шляхом зниження питомих енерговитрат та збільшення продуктивності виплавки, визначає мету дисертаційної роботи.

Згідно поставленої мети при розробці механотронної системи для моделювання процесів в проміжній ємності електронно-променевої установки та напружено-деформованого стану мембран гідравлічного виконавчого мембранного механізму застосовано методи скінчених різниць та скінчених елементів. При моделюванні процесів в проміжній ємності використано метод дробових кроків рішення багатовимірних задач. При створенні алгоритмів керування траєкторією руху електронного променя в проміжній ємності та алгоритму витягування зливку з кристалізатора застосовані методи теорії автоматичного керування.

Наукова новизна роботи дисертаційної роботи полягає в наступних положеннях:

- вперше на основі розробленої нестационарної тривимірної математичної моделі тепло-масообміну в проміжній ємності при електронно-променевої плавці науково обґрунтовано застосування механотронної системи керування виплавою титану, яка дозволяє обирати раціональні тепло-енергетичні характеристики процесу плавки титану з урахуванням подачі шихти та динаміки наплавлення зливку в кристалізаторі;

- вперше на основі дослідження процесу плавки титану розроблено метод раціонального розподілу потужності обігріву розплаву в проміжній ємності електронно-променевої установки, за рахунок керування траєкторією руху електронного променя із зворотним зв'язком по температурі розплаву та положенню нерозплавленої шихти відносно зливного носка;

- отримано залежності для вибору раціональних геометричних параметрів гідравлічного мембранного виконавчого механізму для подачі коливань на зливки в межах заданого ресурсу роботи, які враховують напружено-деформований стан сталевих мембран.

Адекватність розробленої математичної моделі процесу в проміжній ємності, розрахунків напружено-деформованого стану мембрани, роботи алгоритмів керування траєкторією руху електронного променя та механотронної системи керування виплавою титану в цілому підтверджена

результатами моделювання, які були проведені за допомогою програмного пакету MATLAB, програмних пакетів інженерних розрахунків Ansys Mechanical APDL, Ansys Fluent та COMSOL Multiphysics. Розроблені комп'ютерні моделі можуть також бути використані для перевірки правильності вибору технологічних параметрів чи алгоритмів керування траєкторією руху електронного променя при плавці титанового розплаву в проміжній ємності, при виборі раціональних геометричних параметрів мембрани гідравлічного мембранного виконавчого механізму для забезпечення його необхідного ресурсу роботи.

Практична цінність одержаних результатів полягає в наступному:

- запропоновано механотронну систему керування виплавою титану при електронно-променевої плавці зі зворотним зв'язком по температурі розплаву в проміжній ємності та по рівню розплаву в кристалізаторі, яка дозволяє, у порівнянні з ручним керуванням, підвищити на 18% ефективність роботи, у тому числі зменшити на 14% енергоспоживання, збільшити на 16% продуктивність виплавки та знизити втрати маси зливку при обробці поверхні до 7%;

- розроблено алгоритм керування траєкторією руху електронного променя в ПЄ зі зворотним зв'язком по температурі за допомогою тепловізора, який дозволяє отримати однорідні температурні поля в діапазоні 1950...2200 К, розрахувати швидкість подачі шихти в зону плавки, і як результат – отримати зливки з необхідним хімічним складом;

- запропоновано спосіб витягування зливку з кристалізатора з подачею додаткових коливань на нього (патент № 91877 України), який дозволяє за допомогою гвинтової передачі та гідравлічного мембранного виконавчого механізму здійснювати грубе та точне регулювання рівня розплаву в кристалізаторі, завдяки чому зменшується вірогідність розриву поверхні та отримання гофрів на готових зливках і знижуються втрати матеріалу при подальшій обробці зливків;

- розроблено та запатентована конструкцію гідравлічного мембранного виконавчого механізму (патент № 91889 України) і запропоновано інженерну

методику вибору його раціональних геометричних параметрів на основі розрахунку напружено-деформованого стану мембрани.

Використання запропонованого способу керування траєкторією руху електронним променем при одночасній роботі декількох електронно-променевих гармат в процесі обігріву в проміжній ємності забезпечує підвищення витрати титанового розплаву в необхідному температурному діапазоні в кристалізатор, що дозволяє скоротити час на наплавлення зливку. Одержані в роботі практичні результати прийняті до впровадження на підприємствах ДП НВЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (Київ) та ТОВ «Стратегія БМ» (Київ).

Запропонована інженерна методика вибору раціональних геометричних параметрів, яка дозволяє оцінити довговічність існуючих і підвищити довговічність нових приводів подачі коливань, прийнята до впровадження на підприємстві ДНВК «КІА» (Київ).

Новизну результатів дослідження захищено 2-ма патентами України на корисні моделі, зокрема системи витягування зливку з кристалізатору (Патент № 91877 України), а також конструкції гідравлічного мембранного виконавчого механізму двосторонньої дії (Патент № 91889 України). Результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес: кафедри прикладної механіки та машин Київського національного університету технології та дизайну при викладанні курсу «Мехатроніка в галузевому машинобудуванні» та «САМ-технології комп'ютерно-інтегрованого обладнання»; кафедри машинознавства Національного авіаційного університету при викладанні курсу «Details of Machines» та «Основи конструювання»; кафедри прикладної гідроаеромеханіки та механотроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» при викладанні лекційного курсу «Особливості проектування систем гідроавтоматики» та в курсі лабораторних робіт з дисципліни «Мікропроцесорне управління мехатронних модулів та систем».

Ключові слова: механотронна система, виплавка титану, гідравлічний мембранний механізм, проміжна ємність, алгоритм керування.

Основні результати дисертаційних досліджень опубліковані в 20 наукових працях, перелік яких наведено нижче.

У фахових виданнях:

1. Грабовський Г.Г. Механотронна система керування плавкою титану. Постановка задачі / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Промислова гідравліка та пневматика. – 2012. – №1 (35). – С.101–105.

2. Грабовський Г.Г. Система керування витягуванням титанового зливку з кристалізатора при електронно-променевої плавці / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Промислова гідравліка та пневматика. – 2013. – №2 (40). – С.5–10.

3. Цибрій Ю.О. Моделювання розподілу температур титанового розплаву з урахуванням його течії / Ю.О. Цибрій, Г.Г. Грабовський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2014. – №3 (72) – С.65–71. (видання входить до наукометричних баз даних Google Scholar, РІНЦ, Open Academic Journals Index, CiteFactor).

4. Tsibriy Iuriy Heat exchange calculation in the intermediate container under electron-beam melting / Iuriy Tsibriy, Heorhiy Grabovskiyy // Metallurgical and Mining Industry – 2015. – №5 – pp. 51 – 60. (видання входить до наукометричних баз даних Scopus, Index Copernicus, eLibrary, Scientific Indexing Services, UlrichsWEB, Academic Resource Index "ResearchBib", WorldCat, Eurasian Scientific Journal Index).

5. Цибрій Ю.О. Мехатронна система керування плавкою титану зі зворотним зв'язком по температурі та по рівню розплаву в кристалізаторі / Ю.О. Цибрій // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2017. – №5 (235). – С. 100 – 105.

6. Цибрій Ю.О. Аналіз напружено-деформованого стану мембрани гідравлічного мембранного механізму приводу витягування з зливку кристалізатора / Ю.О. Цибрій, Г.Г. Грабовський, П.Л. Носко. // Проблеми тертя та зношування. – 2017. – №3. – С. 108 – 114. (видання входить до наукометричних баз даних Index Copernicus, EBSCO, Google Scholar, WorldCat, РІНЦ).

Патенти України на корисну модель

7. Патент № 91877 України. МПК В22D 29/00 F16H 43/00. Система витягування зливка з кристалізатора / Грабовський Г.Г., Цибрій Ю.О., Пап П.А., Дереча О.Я.; заявники та правовласники Грабовський Г.Г., Цибрій Ю.О., Пап П.А., Дереча О.Я. – № 201311382, заявл. 26.09.2013, опубл. 25.07.2014, бюл. Бюл.№ 14, 2014 р.

8. Патент № 91889 України. МПК F16H 43/00. Гідравлічний мембранний виконавчий механізм двосторонньої дії / Грабовський Г.Г., Цибрій Ю.О.; заявники та правовласники Грабовський Г.Г., Цибрій Ю.О. – № 2013 13334, заявл. 15.11.2013, опубл. 25.07.2014, бюл. Бюл.№ 14, 2014 р.

Матеріали та тези конференцій

9. Грабовський Г.Г. Механотронна система керування плавки титану / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XVII міжнародної науково-технічної конференції. – Черкаси: Академія пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля МНС України, 2012. – С.114 – 116.

10. Грабовський Г.Г. Система витягування зливку з кристалізатору / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XVIII міжнародної науково-технічної конференції. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – С.98–99.

11. Грабовський Г.Г. Керування температурою титанового розплаву в проміжній ємності при електронно-променевої плавці. / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Автоматика: Матеріали доповідей XX міжнародної конференції з автоматичного управління, присвяченої 100-чю з дня народження академіка НАНУ О.Г. Івахненка. – Миколаїв: Національний університет кораблебудування, 2013. – С.181.

12. Грабовський Г.Г. Моделювання процесу обігріву розплаву титану з урахуванням його течії. Постановка задачі / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XIX міжнародної науково-технічної конференції. – Кіровоград, 2014. – С.110–111.

13. Цибрій Ю.О. Використання гідравлічних мембранних виконавчих механізмів при витягуванні зливків з кристалізатора плавильної печі / Ю.О. Цибрій, Г.Г. Грабовський // Гідро- та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування. Міжнародна науково-технічна інтернет-конференція. Збірник тез доповідей. – Вінниця, 2014. – С.58–59.

14. Грабовський Г.Г. Механізм витягування зливку з кристалізатора / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Промислова гідравліка і пневматика. Матеріали конференції. – Мелітополь: Таврійський державний аграрно-технічний університет, 2014. – С.62.

15. Грабовський Г.Г. Моделювання процесу обігріву розплаву титану з урахуванням його течії. Аналіз результатів моделювання. / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XX міжнародної науково-технічної конференції. – К., 2015. – С.43 – 45.

16. Цибрій Ю.О. Алгоритм керування траєкторією електронного променя при плавлі титану / Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XXI міжнародної науково-технічної конференції. – К., 2016. – С.121–123.

17. Грабовський Г.Г. Розрахунок на міцність мембрани гідравлічного мембранного механізму / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XXI міжнародної науково-технічної конференції. – К., 2016. – С.155–157.

18. Грабовський Г.Г. Розрахунок мембрани гідравлічного мембранного механізму на втомну міцність / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // XVII міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика». Матеріали конференції. – Харків: Український державний університет залізничного транспорту, 2016. – С.125 – 126.

19. Цибрій Ю.О. Розробка мехатронної системи керування електронно-променевою плавкою титану / Ю.О. Цибрій // 13-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові. Матеріали симпозіум. – Львів, 2017. – С. 209–210.

20. Цибрій Ю.О. Мехатронна система керування плавкою титану із використанням зворотного зв'язку по температурі та по рівню розплаву в кристалізаторі / Ю.О. Цибрій, Г.Г. Грабовський // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали ХХІІ міжнародної науково-технічної конференції. – Черкаси, 2017. – С.114 – 115.

ABSTRACT

Tsibrii I.O. Mechatronic control system for melting titanium. – Qualification scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.02.02 – Engineering Science. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" MES of Ukraine, Kyiv, 2018.

The thesis is devoted to the increase of efficiency of the process of titanium ingot's production, which increases the productivity of melting, improves the quality of ingots by developing of the mechatronic control system for electron beam melting with molten metal's temperature in the intermediate capacity and melt's level in crystallizer feedback.

In Ukraine, the industrial production of high-quality titanium ingots is associated with vacuum-arc, electroslag, plasma and electron beam melting. The latter is considered to be the most advanced technology, due to the high degree of purification of ingot from impurities, the lack of strict requirements for the chemical and physical composition of charge material and the possibility of active intervention in the technological process. However, electron beam melting has not high enough productivity and is one of the most energy-consuming. Due to the lack of measurement of the titanium melt's temperature in the intermediate capacity, the process of melting significantly depends on the choice of the heating mode by the operator. In addition, during ingot's pulling-out from the crystallizer the various defects are formed on its surface, for elimination of which is lost to 10% of ingot's mass during its processing.

The common cause of the above disadvantages is the inconsistency of the control's process of melting, ingot's pulling-out and charge supply into the melting area. Therefore, the development of a mechatronic control system for the titanium melting by electron beam melting, which coordinates the control of titanium ingot production and increases their efficiency by reducing specific energy consumption and increasing the productivity of the melting, determines the purpose of the dissertation work.

According to the stated purpose, the methods of finite element and the method of finite-difference are used in the development of a mechatronic system for the simulation of processes in the intermediate capacity of the electron beam unit and the membranes stress-strain state of the hydraulic executable membrane mechanism. During the simulation of the processes in the intermediate capacity, the method of fractional steps for solving multidimensional problems is used. During the creating of the algorithms for controlling the trajectory of the motion of an electron beam in the intermediate capacitance and the algorithm for ingot`s pulling-out from the crystallizer, the methods of the theory of automatic control are used.

The scientific novelty of the dissertation work consists in the following principles:

- for the first time on the basis of the developed non-stationary three-dimensional mathematical model of heat-mass transfer with electron beam melting in the intermediate capacity, the application of the mechatronic control system for titanium melting was scientifically substantiated, which allows to choose the rational heat-energy characteristics of the titanium melting taking into account the charge supply and the dynamics of ingot`s surfacing into the crystallizer;

- for the first time, on the basis of the study of the regularities of the titanium melting process, a method for rational distribution of the melt heating in the intermediate capacity of the electron-beam unit was developed, due to the control of the trajectory of electron beam motion with the temperature of the melt feedback and the position of the unmelted charge relative to the drain sock;

- dependencies were obtained for choosing rational geometric parameters of the steel membrane of the hydraulic executable mechanism, which take into account the stress and strain state of the membrane and its required durability.

The adequacy of the developed mathematical model of the process in the intermediate capacity, the calculations of the stress-strain state of the membrane, the work of the algorithms for control of the trajectory of the electron beam`s motion and the mechatronic control system for titanium melting is generally confirmed by the simulation results that were performed using the software package MATLAB, Ansys

Mechanical APDL, Ansys Fluent and COMSOL Multiphysics. The developed computer models may also be used to verify the correctness of the choice of technological parameters or algorithms for control of the trajectory of the electron beam's motion during titanium melt in the intermediate capacity, or during the choice the rational geometric parameters of the membrane of hydraulic executable membrane mechanism to provide its required work life.

The practical importance of the results obtained is as follows:

- for the first time a mechatronic control system for the titanium melting for electron beam melting with molten metal's temperature in the intermediate capacity and melt's level in crystallizer feedback was developed, which allows, in comparison with manual control, to increase efficiency by 18%, including 14% decrease of power consumption, increase the productivity of melting by 16% and reduce the ingot's weight loss during the next surface treatment up to 7%;

- the control system of the trajectory of the electron beam's motion in the intermediate capacity with temperature feedback with the aid of a thermal imager is proposed and the algorithm for control of the trajectory of the electron beam's motion is proposed, which allows to obtain uniform temperature fields in the range 1950...2200 K, to determine the input of the charge supply to the melting zone and as the result to obtain ingots with the necessary chemical composition;

- the method of the ingot pulling-out from the crystallizer with additional oscillations on ingot is offered, which allows: using a screw drive and hydraulic executable membrane mechanism to carry out rough and precise regulation of the melt level in the crystallizer; to reduce the rupture's probability of the surface and to reduce of the ingot's surface imperfection carrying out on finished ingots; to predict decrease to 7% of material loss during next ingot's treatment.

- the design of hydraulic executable membrane mechanism's membranes is developed and the engineering method of choice of their rational geometric parameters is proposed.

The use of the proposed method of control of the trajectory of electron beam motion during simultaneous work of several electron beam guns during the heating

process in the intermediate capacity provides an increase the flow of titanium melt into the crystallizer with required temperature range, which reduces the time for the ingot`s producing. The practical results which obtained in the dissertation are accepted for implementation at the enterprises of SIC "Titan" the E.O. Paton electric welding institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv and LLC "Stratehiya Bm", Kyiv.

The proposed engineering method of rational geometric parameters choice, which allows to assess the durability of existing and improve the durability of new oscillation drives, is adopted for implementation at the SSPC "Kyiv Institute of Automatics".

The novelty of the research results is protected by 2 patents of Ukraine on utility models, in particular, the system of ingots pulling-out from the crystallizer (Patent № 91877 of Ukraine), as well as designs of a hydraulic membrane actuating mechanism of double-direction action (Patent № 91889 of Ukraine). The results of the dissertation work were introduced into the educational process: at the Department of applied mechanics and machines of the Kyiv National University of Technology and Design at the teaching of the courses "Mechatronics in industrial engineering " and "CAM-technologies of computer-integrated equipment"; at the Department of Science of Machine of the National Aviation University at the course "Details of Machines" and "Fundamentals of Design"; at the Department of Applied Hydroaeromechanics and Mechanotronics of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" at the lecture course "Features of the hydroautomatics systems design" and at the course of laboratory work of course "Microprocessor controll of mechatronic modules and systems".

Key words: mechatronic system, titanium melting, hydraulic membrane mechanism, intermediate capacity, control algorithm.

The main results of the dissertation researches are published in 20 scientific works that are show below.

In professional publications:

1. Grabovsky G.G. Mechatronic control system of titanium melting. Formulation

of the problem / G.G. Grabovsky, I.O. Tsybrii // Industrial hydraulics and pneumatics. – 2012. – No. 1 (35). – P.101 – 105.

2. Grabovsky G.G. Control system for titanium ingot pulling-out from the crystallizer during electron beam melting / G.G. Grabovsky, I.O. Tsybrii // Industrial hydraulics and pneumatics. – 2013. – No. 2 (40). – P.5 – 10.

3. Tsybrii I.O. Simulation of temperature distribution in titanium melt considering its flow / I.O. Tsybrii, G.G. Grabovsky // Bulletin of NTUU "KPI". Serie Machine-Building. – 2014 – No. 3 (72) – P.65 – 71.

4. Tsibriy Iuriy Heat exchange calculation in the intermediate container under electron-beam melting / Iuriy Tsibriy, Heorhiy Grabovskiy // Metallurgical and Mining Industry – 2015. – №5 – pp.51– 60.

5. Tsybrii I.O. Mechatronic control system for the titanium melting for electron beam melting with temperature and melt`s level in crystallizer feedback / I.O. Tsybrii // LIST OF Volodymyr Dahl East-Ukrainian National University: – 2017. – № 6 (240) – P. 76 – 82.

6. Tsybrii I.O. Analysis of stress-strain state of hydraulic membrane mechanism of ingot`s pulling-out drive from crystallizer / I.O. Tsibrii, G. G. Grabovsky, P. L. Nosko. // Problems of friction and wear. – 2017 – №3. – P. 108 – 114.

Patents and Certificates

7. Patent No. 91877 of Ukraine (MIIK) B22D 29/00 F16H 43/00. The system for pulling ingot from a crystallizer / Grabovsky G.G., Tsibrii I.O., Pap P.A., Derecha O.Ya. ; Applicants and rightholders Grabovsky G.G., Tsibrii I.O., Pap P.A., Derecha O.Ya. – No. 201311382, application. September 26, 2013, published. July 25, 2014, bul. Bulletin No. 14, 2014.

8. Patent No. 91889 of Ukraine. (MIIK) F16H 43/00. Hydraulic membrane actuator of double-direction action / Grabovsky G.G., Tsibriy I.O.; Applicants and rightholders Grabovsky G.G., Tsibriy Y.O. – No. 2013 13334, application. November 15, 2013, pub. July 25, 2014, bul. Bulletin No. 14, 2014.

Materials and conference abstracts

9. Grabovsky G.G. Mechatronic control system of titanium melting / G.G.

Grabovsky, I.O. Tsibrii // Hydroaeromechanics in engineering practice: materials of XVII international scientific and technical conference. – Cherkassy: Academy of Fire Safety of Heroes of Chernobyl, Ministry of Emergencies, 2012. – P.114 – 116.

10. Grabovsky G.G. System for ingot`s pulling-out from a crystallizer / G.G. Grabovsky, I.O. Tsibrii // Hydroaeromechanics in engineering practice: materials of the XVII International Scientific and Technical Conference. – Kyiv: NTUU "KPI", 2013. – p.98 – 99.

11. Grabovsky G.G. Control of the temperature of the titanium melt in the intermediate capacity during electron beam melting. / G.G. Grabovsky, I.O. Tsibrii // Automatics: Materials of reports of the XX International Conference on Automatic Control, devoted to the 100th birthday of Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine O.G. Ivakhnenko – Nikolaev: National University of Shipbuilding, 2013. – P.181.

12. Grabovsky G.G. Simulation of the process of titanium melt heating with its flow. Problem statement / G.G. Grabovsky, I.O. Tsibrii // Hydroaeromechanics in engineering practice: materials of the XIX International Scientific and Technical Conference. – Kirovograd, 2014. – P.110 – 111.

13. Tsibrii I.O. Use of hydraulic membrane actuators for ingots pulling-out from melting furnace`s crystallizer / I.O. Tsibrii, G.G. Grabovsky // Hydraulic and pneumatic drives of machines - modern achievements and applications. International scientific and technical internet conference. Collection of abstracts. – Vinnytsya, 2014. – P. 58 – 59.

14. Grabovsky G.G. The mechanism of ingot`s pulling-out from a crystallizer / G.G. Grabovsky, I.O. Tsibrii // Industrial hydraulics and pneumatics. Conference materials. – Melitopol: Tavria State Agrarian and Technical University, 2014. – P.62.

15. Grabovsky G.G. Simulation of the process of titanium melt heating with its flow. Analysis of simulation results. / G.G. Grabovsky, I.O. Tsibrii // Hydroaeromechanics in engineering practice: materials of XIX international scientific and technical conference. – Kyiv, 2015. – P.43 – 45.

16. Tsibrii I.O. Algorithm for control of the electron beam`s trajectory of the during titanium melting / I.O. Tsibrii // Hydroaeromechanics in engineering practice: Materials of the XIII International Scientific and Technical Conference. – Kyiv, 2016. – P.121 – 123.

17. Grabovsky G.G. Structural analysis of the membrane of the hydraulic membrane mechanism / G.G. Grabovsky, I.O. Tsibrii // Hydroaeromechanics in engineering practice: Materials of the XIII International Scientific and Technical Conference. – Kyiv, 2016. – P.155–157.

18. Grabovsky G.G. Endurance strength calculation of the membrane of the hydraulic membrane mechanism / G.G. Grabovsky, I.O. Tsibrii // XVII international scientific and technical conference "Industrial hydraulics and pneumatics". Conference materials. – Kharkiv: Ukrainian State University of Railway Transport, 2016. – P.125 – 126.

19. Tsibrii I.O. Development of mechatronic control system for electron beam melting of titanium / I.O. Tsibrii // 13th International Symposium of Ukrainian Mechanical Engineers in Lviv. Materials of the symposium. – Lviv, 2017. – P. 209 – 210.

20. Tsibrii I.O. Mechatronic control system for titanium melting using temperature and melt`s level in the crystallizer feedback / I.O. Tsibrii, G.G. Grabovsky // Hydroaeromechanics in engineering practice: Materials of the XIII International Scientific and Technical Conference. – Cherkasy, 2017. – P.114 – 115.

ЗМІСТ

ВСТУП	21
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД РІВНЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ІСНУЮЧИХ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ВИПЛАВКИ ТИТАНУ	27
1.1. Аналіз рівня автоматизації систем виплавки титану.....	27
1.1.1. Технології виготовлення високоякісного титану та сплавів на його основі	27
1.1.2. Опис існуючих електронно-променевих установок	31
1.2. Аналіз причин утворення дефектів на поверхні зливку та існуючих способів витягування зливку з кристалізатора	34
1.2.1. Причини утворення дефектів на поверхні зливка при електронно- променевої плавці	34
1.2.2. Способи витягування зливку з кристалізатора	37
1.2.3. Приводи витягування зливку з кристалізатора	39
1.2.4. Датчики визначення рівня розплаву в кристалізаторі.....	40
1.2.5. Системи керування приводом витягуванням зливку з кристалізатора	41
1.3. Визначення розподілу температур розплаву в проміжній ємності чисельними методами.....	43
1.4. Аналіз існуючих систем керування розподілом потужності на поверхні розплавленого металу шляхом зміни положення променя електронно- променевих гармат.....	47
1.5. Мета та задачі дослідження.....	52
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ МЕХАНОТРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВИПЛАВКОЮ ТИТАНУ ЗІ ЗВОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ ПО ТЕМПЕРАТУРІ РОЗПЛАВУ ТА ПО РІВНЮ РОЗПЛАВУ В КРИСТАЛІЗАТОРІ	54

2.1. Функціональна схема механотронної системи керування виплавою титану	54
2.2. Формалізована математична модель процесу в проміжній ємності	58
2.3. Тестова перевірка моделі процесу в проміжній ємності.....	63
2.3.1. Моделювання процесу в проміжній ємності з використанням програмного пакету ANSYS	63
2.3.2. Моделювання процесу в проміжній ємності з використанням методу дробових кроків в програмному пакеті MATLAB	64
2.3.3. Порівняння отриманих результатів тестових задач за допомогою ANSYS та MATLAB	67
2.4. Дослідження впливу швидкості течії розплаву, потужності обігріву та розподілу потужності обігріву по поверхні ПЄ на теплообмін	70
2.5. Висновки.....	78
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ РУХОМ ЕЛЕКТРОННОГО ПРОМЕНЯ ЗІ ЗВОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ ПО ТЕМПЕРАТУРИ НА ТЕПЛО-МАСООБМІН В ПРОМІЖНІЙ ЄМНОСТІ	
3.1. Алгоритм керування траєкторією руху електронного променя зі зворотним зв'язком по температурі	80
3.2. Порівняння алгоритмів керування траєкторією руху електронного променя та вибір раціонального для обігріву розплаву в проміжній ємності	86
3.2.1. Обігрів розплаву при відсутності нерозплавлених шматків шихти	86
3.2.2. Обігрів розплаву при наявності нерозплавлених шматків шихти ...	88
3.3. Розробка та аналіз роботи розробленого узагальненого алгоритму керування траєкторією руху електронного променя	90
3.4. Керування траєкторією руху електронного променя при одночасній роботі декількох електронно-променевих гармат	95
3.5. Висновки.....	99

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА КОНТУРУ ВИТЯГУВАННЯ ЗЛИВКУ З КРИСТАЛІЗАТОРА.....	102
4.1. Контур витягування зливку з кристалізатора.....	102
4.1.1. Обґрунтування необхідності подачі додаткових коливань на зливки.....	102
4.1.2. Спосіб витягування зливку з кристалізатора при ЕПП.....	104
4.1.3. Використання гідравлічного мембранного виконавчого механізму для подачі коливань на зливки.....	107
4.2. Розрахунок мембрани гідравлічного мембранного виконавчого механізму.....	110
4.2.1. Математична модель напружено-деформованого стану мембрани гідравлічного мембранного виконавчого механізму.....	110
4.2.2. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану мембрани гідравлічного мембранного механізму.....	113
4.2.3. Тестове модельне дослідження міцності мембрани гідравлічного мембранного виконавчого механізму.....	117
4.3. Інженерна методика вибору раціональних геометричних параметрів мембран на основі аналізу напружено-деформованого стану.....	122
4.4. Висновки.....	127
РОЗДІЛ 5 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕХАНОТРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВИПЛАВКОЮ ТИТАНУ ЗІ ЗВОТНІМ ЗВ'ЯЗКОМ ПО ТЕМПЕРАТУРІ РОЗПЛАВУ В ПРОМІЖНІЙ ЄМНОСТІ ТА ПО РІВНЮ РОЗПЛАВУ В КРИСТАЛІЗАТОРІ.....	129
5.1. Математичне моделювання роботи механотронної системи керування виплавою титану.....	129
5.1.1. Функціональна схема механотронної системи керування виплавою титану.....	129
5.1.2. Моделювання роботи механотронної системи керування виплавою титану.....	132

5.2. Аналіз результатів моделювання роботи механотронної системи керування випларкою титану	133
5.3. Оцінка ефективності роботи розробленої механотронної системи керування випларкою титану та роботи електронно-променевої установки керованої оператором	136
5.4. Висновки.....	140
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	143
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	145
ДОДАТКИ.....	162
ДОДАТОК А. Програма моделювання тепло-масообміну в проміжній ємності в MATLAB.....	162
ДОДАТОК Б. Порівняння температурних полів отриманих за допомогою MATLAB та ANSYS Fluent.....	165
ДОДАТОК В. Програма моделювання обігріву проміжної ємності при використанні алгоритму А в MATLAB	171
ДОДАТОК Г. Програма моделювання обігріву проміжної ємності при використанні алгоритму В в MATLAB	175
ДОДАТОК Г. Програма моделювання обігріву проміжної ємності при роботі алгоритму С в MATLAB	179
ДОДАТОК Д. Програма моделювання обігріву проміжної ємності при використанні алгоритму D в MATLAB	184
ДОДАТОК Е. Результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану мембрани, отримані за допомогою COMSOL Multiphysics.....	190
ДОДАТОК Є. Програма моделювання роботи механотронної системи керування випларкою титану при електронно-променевій плавці в MATLAB.....	194
ДОДАТОК Ж. Акти впровадження.....	203

ВСТУП

Актуальність теми

Розвиток сучасної техніки залежить від використання високоякісних металевих матеріалів, які мають високі експлуатаційні фізико-хімічні властивості, а саме високу питому міцність у широкому температурному діапазоні, хімічну стійкість в агресивних середовищах та інші спеціальні властивості. До таких матеріалів належать титан та сплави на його основі.

На сьогодні в Україні титан отримують за допомогою вакуумно-дугової, електрошлакової, плазмової та електронно-променевої плавки (ЕПП). ЕПП вважається найбільш прогресивною технологією, оскільки титановий зливочок має найвищу степінь очищення, за рахунок чого непотрібно виконувати переплав зливку багатократно, відсутні жорсткі вимоги до шихтового матеріалу по хімічному та фізичному складу, є можливість активного втручання в технологічний процес.

Порівняно з існуючими технологіями плавки, ЕПП має недостатньо високу продуктивність, та на сьогодні є однією з найбільш енергозатратних. Так питоме енергоспоживання однієї плавки досягає 3 кВт·год/кг. Процес ЕПП також суттєво залежить від впливу людського фактору. Для виплавки зливку довжиною 1.6 м різними операторами розкид часу відносно середнього становить 14%, що в свою чергу призводить до додаткових витрат електроенергії. Крім цього, при витягуванні зливку з кристалізатора на його поверхні утворюються різноманітні дефекти, для усунення яких зливочок додатково обробляється з втратами до 10% маси.

Використання інформаційних технологій та комп'ютерних систем керування дозволяє підвищити ефективність виплавки титану на основі розробки механотронної системи керування найбільш енерговитратної частини процесу ЕПП – оплавлення шихтового матеріалу в проміжній ємності (ПЄ) та витягування зливку з кристалізатора. Таким чином, актуальною науково-технічною задачею є підвищення ефективності ЕПП шляхом зниження питомих

енерговитрат, збільшення продуктивності виплавки та покращення якісних характеристик зливків.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами
Дисертаційна робота виконана відповідно до плану наукових досліджень, проведених на кафедрі прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки механіко-машинобудівного інституту КПІ ім. Ігоря Сікорського в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт за темами: №2647-п «Пасивні теплові та комбіновані гідроприводи позиціонування енергосприймаючих елементів екологічно-чистих відновлюваних джерел енергії» (№ держреєстрації 0113U001649); №2648-п «Підвищення ефективності мехатронних систем за рахунок удосконалення гідравлічних систем та кавітаційних виконавчих пристроїв» (№ держреєстрації 0113U001548).

Мета і задачі дослідження: : *Метою дослідження є підвищення ефективності процесу виготовлення титанових зливків, а саме зниження питомих енерговитрат та збільшення продуктивності виплавки шляхом розробки механотронної системи керування виплавою титану при електронно-променевої плавці.*

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання наступних задач:

1. Провести аналіз резервів підвищення ефективності процесу виготовлення титанових зливків при електронно-променевої плавці.

2. Теоретично обґрунтувати застосування механотронної системи керування виплавою титана зі зворотним зв'язком по температурі розплаву в проміжній ємності і по рівню розплаву в кристалізаторі.

3. Дослідити вплив швидкості течії розплаву, потужності обігріву електронно-променевої гармати, коефіцієнту розподілу потужності обігріву по поверхні проміжної ємності та алгоритмів керування рухом електронного променя на витрату розплаву з проміжної ємності в кристалізатор.

4. Науково обґрунтувати та розробити спосіб витягування титанового зливку з кристалізатора та конструкцію приводу двосторонньої дії для подачі на зливки додаткових коливань.

5. Розробити інженерну методику вибору раціональних геометричних параметрів приводу подачі додаткових коливань на основі дослідження впливу його конструктивних параметрів на довговічність.

6. Оцінити ефективність механотронної системи керування виплавою титану зі зворотним зв'язком по температурі розплаву в проміжній ємності та по рівню розплаву в кристалізаторі.

Об'єкт дослідження – процес виготовлення титанових зливків при електронно-променевої плавці.

Предмет дослідження – механотронна система керування електронно-променевою виплавою титану.

Методи дослідження

Для моделювання процесів в ПЄ електронно-променевої установки (ЕПУ) та напружено-деформованого стану (НДС) мембран гідравлічного мембранного виконавчого механізму (ГМВМ) застосовано метод скінчених різниць з використанням програмного пакета ANSYS та COMSOL. При моделюванні процесів в ПЄ використано метод дробових кроків рішення багатовимірних задач в програмному пакеті MATLAB. При створенні алгоритмів керування траєкторією руху електронного променя в ПЄ та витягування зливку з кристалізатора застосовані методи теорії автоматичного керування.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше на основі розробленої нестационарної тривимірної математичної моделі тепло-масообміну в проміжній ємності при електронно-променевої плавці науково обґрунтовано застосування механотронної системи керування виплавою титану, яка забезпечує вибір раціональних тепло-енергетичних характеристик процесу плавки титану з урахуванням подачі шихти та динаміки наплавлення зливку в кристалізаторі.

2. Вперше на основі дослідження процесу плавки титану розроблено метод раціонального розподілу потужності обігріву розплаву в проміжній ємності електронно-променевої установки, за рахунок керування траєкторією руху

електронного променя із зворотним зв'язком по температурі розплаву та положенню нерозплавленої шихти відносно зливного носка.

3. Отримано залежності для вибору раціональних геометричних параметрів гідравлічного мембранного виконавчого механізму для подачі коливань на зливков в межах заданого ресурсу роботи, які враховують напружено-деформований стан сталевих мембран.

Практична цінність одержаних результатів:

1. Запропоновано механотронну систему керування виплавою титану при електронно-променевої плавці зі зворотним зв'язком по температурі розплаву в проміжній ємності та по рівню розплаву в кристалізаторі, яка дозволяє, у порівнянні з ручним керуванням, підвищити на 18% ефективність роботи, у тому числі зменшити на 14% енергоспоживання, збільшити на 16% продуктивність виплавки та знизити втрати маси зливку при обробці поверхні до 7%.

2. Розроблено алгоритм керування траєкторією руху електронного променя в ПЄ зі зворотним зв'язком по температурі за допомогою тепловізора, який дозволяє отримати однорідні температурні поля в діапазоні 1950...2200 К, розрахувати швидкість подачі шихти в зону плавки, і як результат – отримати зливков з необхідним хімічним складом.

3. Запропоновано спосіб витягування зливку з кристалізатора з подачею додаткових коливань на нього (патент № 91877 України), який дозволяє за допомогою гвинтової передачі та гідравлічного мембранного виконавчого механізму здійснювати грубе та точне регулювання рівня розплаву в кристалізаторі, завдяки чому зменшується вірогідність розриву поверхні та отримання гофрів на готових зливках і знижуються втрати матеріалу при подальшій обробці зливків.

4. Розроблено та запатентована конструкцію гідравлічного мембранного виконавчого механізму (патент № 91889 України) і запропоновано інженерну методику вибору його раціональних геометричних параметрів на основі розрахунку напружено-деформованого стану мембрани.

Результати дисертаційної роботи впровадженні на підприємствах ДП НВЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (м. Київ), ТОВ «Стратегія БМ» (м. Київ) та ДНВК «КІА» (м. Київ); використовуються в навчальному процесі кафедри прикладної механіки та машин КНУТД, кафедри машинознавства НАУ, кафедри прикладної гідроаеромеханіки та механотроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Особистий внесок здобувача

Основні положення та результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, одержані автором особисто. У спільних роботах автору належать: механотронна система керування виплавою титану при електронно-променевої плавці з використанням автоматичного керування зі зворотним зв'язком по температурі розплаву в ПЄ і по рівню розплаву в кристалізаторі; нестационарна тривимірна математична модель тепло-масообміну в ПЄ з врахуванням течії розплаву та зміни координат джерела нагріву в процесі моделювання; спосіб та розроблений узагальнений алгоритм керування траєкторією руху електронного променя в ПЄ зі зворотнім зв'язком по температурі з використанням тепловізора та додатковим обігрівом прилеглих зон до охолоджених; спосіб та система витягування зливку з кристалізатора з подачею додаткових коливань на зливки за допомогою гідравлічних мембранних приводів; конструкція гідравлічного мембранного виконавчого механізму двосторонньої дії для подачі коливань на зливки по заданому закону незалежно від маси зливку; методика розрахунку на втомну міцність та підбору мембран гідравлічних виконавчих мембранних механізмів для роботи їх в якості приводів подачі додаткових коливань на зливки в кристалізаторі при електронно-променевої плавці.

Апробація результатів дисертації

Основні положення та результати дисертаційного дослідження доповідались та обговорювалися на міжнародній конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (Київ, 2012-2017), XX міжнародній конференції з автоматичного управління, присвяченої 100-чю з дня народження академіка НАНУ О.Г. Івахненка «Автоматика» (м. Миколаїв, 2013), міжнародній

науково-технічній інтернет-конференції «Гідро- та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування» (м. Вінниця, 2014), міжнародній науково-технічній конференції АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика» (2014, 2016), 13-му міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (2017). Дисертаційна робота в повному обсязі доповідалась на розширеному засіданні кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 20 друкованих праць, серед них 6 – статті у провідних наукових фахових виданнях (у тому числі 3 публікації у виданнях України, які включені до науко-метричних баз); 2 – патенти України на корисну модель; 12 – матеріали доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із анотації, вступу, п'яти розділів, 9 додатків та списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертаційної роботи викладено на 209 сторінках машинописного тексту, з них: 144 сторінок основного тексту, 48 сторінок додатків, 72 рисунків, 3 таблиць, списку використаних джерел з 139 найменувань на 17 сторінках, з них 112 кирилицею та 27 латиницею.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД РІВНЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ІСНУЮЧИХ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ВИПЛАВКИ ТИТАНУ

Проведено аналіз відомих ЕПУ та автоматичних систем керування технологічним процесом ЕПП тугоплавких металів і титану, наведені переваги та недоліки існуючих способів витягування зливку з кристалізатора та обігріву титанового розплаву в ПЄ. Сформульовано мету та задачі дисертаційної роботи.

1.1. Аналіз рівня автоматизації систем виплавки титану

1.1.1. Технології виготовлення високоякісного титану та сплавів на його основі

Прогрес сучасної промисловості залежить від використання конструкційних матеріалів з підвищеними вимогами до чистоти їх хімічного складу і властивостей сплавів різного призначення [76]. До таких металевих матеріалів відносяться титан та сплави на його основі [121].

Титан став одним з наймолодших конструкційних матеріалів, які знайшли широке застосування в техніці. Немає жодного іншого металу, виробництво якого отримало б останнім часом настільки бурхливий розвиток. Великий інтерес до титану пояснюється унікальним поєднанням в ньому фізико-механічних та хімічних властивостей і значними запасами в земній корі [31, 48, 57].

Порівнюючи з іншими промисловими металами, титан має високу питому міцність, жароміцність і стійкість в широкому температурному діапазоні, високу в'язкість руйнування (до 350...450 МПа), немагнітичність, низький коефіцієнт лінійного та об'ємного розширення, високу стійкість та міцність при експлуатації в агресивних середовищах. При температурах від 5 К

холодоламкість в титані відсутня. Завдяки вищенаведеним винятковим якостям він використовується в авіаційно-космічній техніці, атомній енергетиці, суднобудуванні, хімічному машинобудуванні і багатьох інших областях [57].

Також титан має ряд технологічних властивостей: має високу текучість і пластичність, обробляється різанням, добре зварюється. Саме цими властивостями зумовлюється виготовлення з титану і сплавів на його основі зливків, фасонного лиття, деформованих напівфабрикатів з подальшим отриманням з них різних деталей.

Найбільші родовища титану знаходяться на території ПАР, Росії, України, Китаю, Японії, Австралії, Індії, Бразилії, Південній Кореї, Казахстану [61, 68].

Україна має великі запаси титанової сировини і розвинену промисловість із підготовки сировини і виробництва титану і сплавів на його основі. В умовах сучасного попиту на титан і титанову продукцію, промисловість його виробництва має хороші перспективи і здатна стати однією з найважливіших базових галузей для виходу з кризової ситуації української економіки [56, 130].

В Україні існує потужна мінерально-ресурсна база з промислового виробництва титану. Виявлено близько 40 родовищ. Рівень потенційних ресурсів титану і потужностей виробництва ільменітових концентратів України оцінюється в 20% від світового балансу [30, 78].

Однак, широке використання титану та його сплавів в сучасній техніці обмежує висока собівартість, яка зумовлена складністю та багатостадійністю процесу виробництва, високими енерговитратами при виплавці, а також необхідністю багаторазового переплаву сировини в глибокому вакуумі, у зв'язку з високою хімічною активністю титану при підвищених температурах (особливо в розплавленому стані до газів) [77, 108].

Сьогодні існує декілька основних технологій переплаву титану (табл. 1.1): вакуумно-дуговий, електронно-променевий з ПЄ, плазмовий з ПЄ, плазмо-дуговий, електрошлаковий та ін. [64].

В даний час промислове виробництво титанових сплавів здійснюється переважно дуговою плавкою в вакуумно-дугових печах. Основною перевагою

даного методу є високі економічні показники, обумовлені відносно низьким енергоспоживанням, яке в 2...4 рази нижче в порівнянні з іншими методами отримання титанових зливків [77]. Але, такий метод має ряд недоліків, що пов'язані з високою вірогідністю зупинки технологічного процесу в результаті пошкодження кристалізатора; необхідністю пресування витратного електрода з великим зусиллям; необхідністю двох- чи трьохразової переплавки початкової заготовки для отримання титану необхідної чистоти та однорідності хімічного складу.

Таблиця 1.1

Продуктивність та питоме енергоспоживання промислових плавильних установок [64]

Метод плавки	Виробництво кг/год	Питома енергоспоживання, кВт·год/кг
	0 50 100 150 200	0 1 2 3 4
Вакуумно-дугова		
Електронно-променева з ПЄ		
Плазмова з ПЄ		
Плазмо-дугова		
Електрошлакова		
Дугова шлакова		
Магнітокерована електрошлакова		

До прогресивних методів отримання титанових зливків відноситься метод електронно-променевої плавки з ПЄ [107, 123]. До переваг методу ЕПП в порівнянні з іншими можна віднести високу якість отриманого зливку за

хімічним складом, структурою металу; відсутність жорстких вимог до вихідного матеріалу по структурі, хімічному складу, геометричній формі, міцності. Частка титанового лому, що використовуються у шихті може досягати 100% [109].

Фізичної основою процесу ЕПП є перетворення кінетичної енергії електронів, розігнаних в електричному полі до швидкостей $10^4 \dots 10^5$ м/с, в теплову при їх гальмуванні в поверхневому шарі металу [109]. В цьому тонкому поверхневому шарі кінетична енергія електронів перетворюється в коливальний рух іонів кристалічної решітки, що проявляється в підвищенні температури металу. Потік прискорених вільних електронів (електронний промінь) для реалізації цього процесу отримують за допомогою ЕПГ.

На рис. 1.1 представлена спрощена схема плавильної камери в електронно-променевої установці (ЕПУ). Шихтовий матеріал 1 подається механізмом подачі 2 в зону плавки на ПЄ 3, де оплавляється ЕПГ 4, розплав рафінується і стікає в кристалізатора 5 з обігрівом від ЕПГ 6. Кристалізований зливочок 7 поступово витягується з кристалізатора механізмом витягування зливку 8.

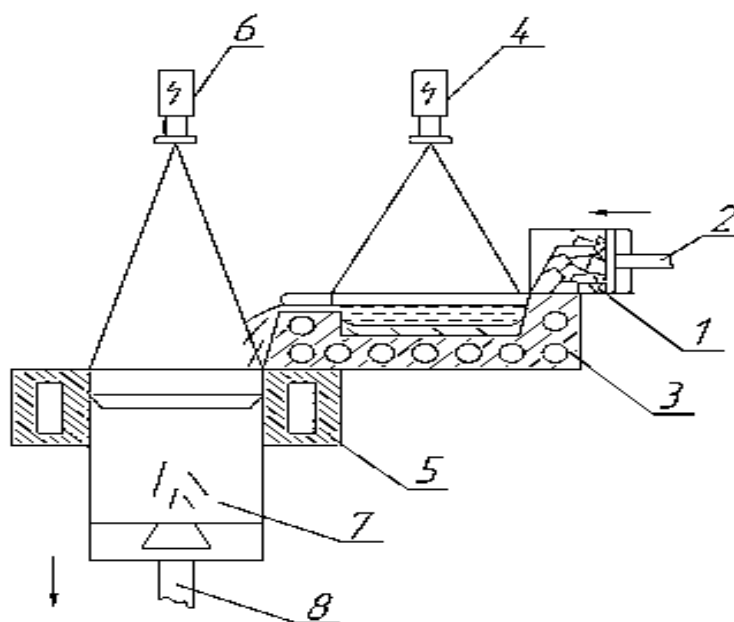


Рис. 1.1. Схема ЕПП з ПЄ: 1 – шихта; 2 – механізм подачі шихти; 3 – ПЄ; 4,6 – ЕПГ; 5 – кристалізатор; 7 – зливочок; 8 – механізм витягування зливку

Але на ряду з існуючими перевагами метод ЕПП має недоліки які потребують вирішення, вони пов'язані з нерівномірністю прогріву розплаву

титану в ПЄ, високою питомою потужністю виплавки, незадовільною якістю поверхні отримуваних зливок та впливом людського фактору на технологічний процес в цілому [33, 34, 99].

1.1.2. Опис існуючих електронно-променевих установок

Технологічні схеми ЕПУ в даний момент постійно вдосконалюються з створенням нових ЕПГ, вакуумних систем, систем керування, а також з появою нових теоретичних даних [111, 132].

ЕПУ можна класифікувати за різними ознаками, але найголовнішими є класифікації по [107, 111]:

- типу подачі шихтового матеріалу в зону плавки (з вертикальною та горизонтальною подачею шихтового матеріалу);
- технологічній схемі переплаву (з ПЄ та без ПЄ).

ЕПУ з горизонтальною подачею шихти та з ПЄ є більш пріоритетними варіантами, оскільки при горизонтальній подачі нижча вірогідність падіння шихти в розплав, а ПЄ усереднює хімічний склад розплаву, в ній він рафінується від включень та домішок і таким чином отримується зливок з кращим хімічним складом та його однорідністю.

Нижче приведений опис типових ЕПУ з використанням яких в подальшому проводилися дослідження [109].

Плавильна камера ЕПУ ТІСО-15М [54, 91] (рис. 1.2) 1 зверху та знизу обмежена технологічними ущільненими кришками. В середині ЕПУ знаходиться бункер з шихтовим матеріалом, який подається механізмом подачі шихтового матеріалу 4 по рольгангу в зону плавки ЕПГ 2. Розплав стікає в ПЄ де витримується деякий час під дією ЕПГ і стікає у водоохолоджуваний кристалізатор в камері зливку 6 і поступово витягується механізмом витягування зливку з кристалізатора 9. За всім процесом оператор спостерігає за допомогою пульту 7 через оглядове вікно зі стробоскопом, що захищає вікно від пошкодження та забруднення, а оператора від рентгенівського випромінювання.

Через верхню кришку 8, можна доставати виплавлений зливок за допомогою цехового крану. Також можна проводити очистку внутрішніх поверхонь ЕПУ. До технологічного отвору в нижній кришці приєднана камера зливка. Через штуцери в нижній кришці подається охолоджуюча вода в кристалізатор і ПЄ [110].

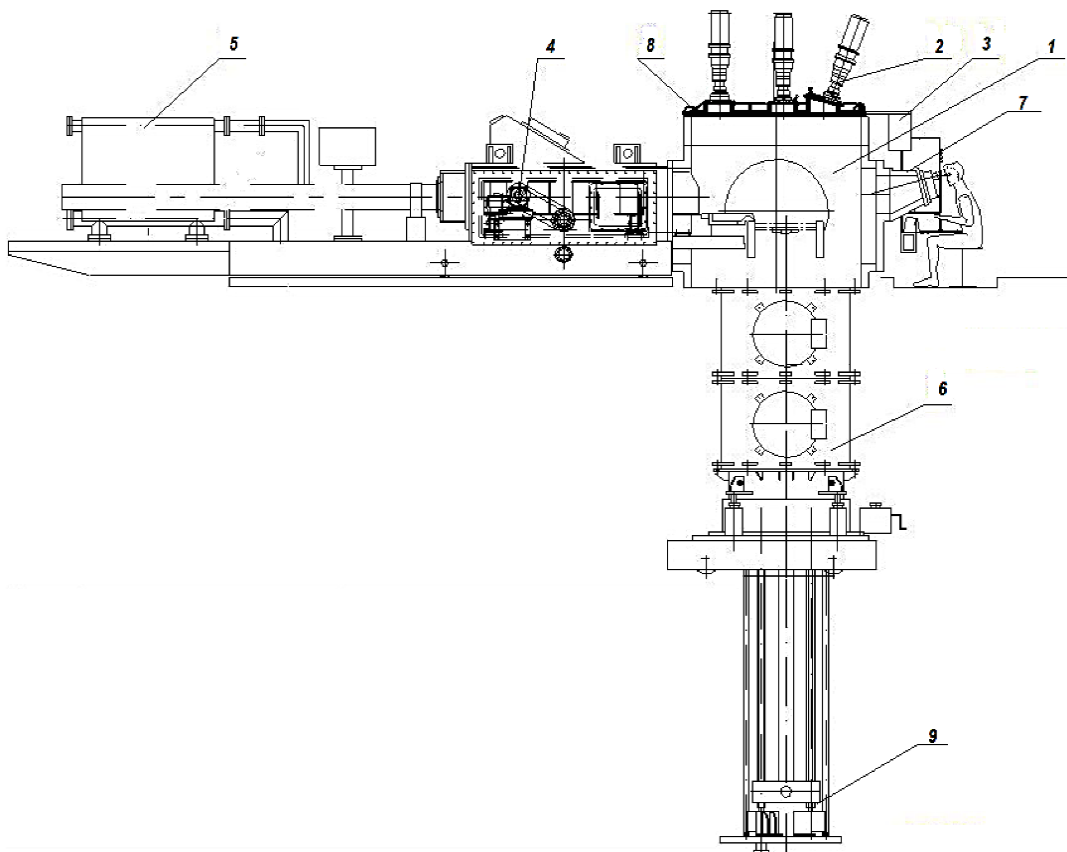


Рис. 1.2. Конструкція ЕПУ ТІСО-15М: 1 – плавильна камера; 2 – ЕПГ; 3 – система подачі газової суміші; 4 – бункер з шихтовим матеріалом та механізмом подачі шихти; 5 – система охолодження та вакуумізації; 6 – камера зливку; 7 – пульт оператора; 8 – верхня кришка; 9 – механізм витягування

В ЕПУ ТІСО-15М додатково встановлена система відеоспостереження за рівнем розплаву в кристалізаторі [91] та блоки програмного керування траєкторіями ЕПГ. Таким чином керування технологічним процесом для оператора спрощується, оскільки витягування зливку відбувається автоматично по досягненні деякого максимального допустимого рівня і припиняється по досягненні нижнього.

Блоки управління ЕПГ керують переміщення електронних променів та формують і програмують до шести конфігурацій променів для кожної з ЕПГ. Вони забезпечують режим захисту краю кристалізатора, тобто промінь під час плавки не виходить за межі технологічної оснастки, а отже вірогідність пропалу зменшується [54].

ЕПУ ВМО (рис. 1.3) [110] призначена для виплавки великогабаритних зливків круглого та прямокутного перерізу [45, 53, 72, 90].

Процес плавки здійснюється наступним чином: шихта 4, завантажена в несплавлювані коробки 3 подається з двох сторін в зону плавки, яка здійснюється в плавильній камері у вакуумі за допомогою електронних променів ЕПГ 6. Управління сканування електронним променем дозволяє контролювати технологічні режими плавки шихти на торцях заготовок, в ПЄ 2, на зливному носку і в кристалізаторі 1 і виключає прожоги технологічної оснастки. Для виключення попадання бризок розплавленого металу в кристалізатор встановлено екран 5.

Сигнал з камер відеоспостереження 7 транслюється на монітори головного пульта управління в режимі реального часу, а також автоматично обробляється системами програмно-технічного комплексу управління. Сигнал з камери контролю рівня ванни металу в кристалізаторі 8 дозволяє в автоматичному режимі управляти пристроєм витягування зливка 9, яке здійснюється в безперервному дискретному режимі.

За системами автоматизації витягування зливку з кристалізатора та режимів роботи ЕПГ установка типу ВМО подібна до ТІСО-15М.

Згідно [10, 26] до головних керуючих функцій систем керування ЕПП включають:

- керування розподілом потужності на поверхні розплавленого металу шляхом зміни положення променю ЕПГ;
- стабілізації рівня розплаву в кристалізаторі і керування витягуванням зливку з кристалізатора.

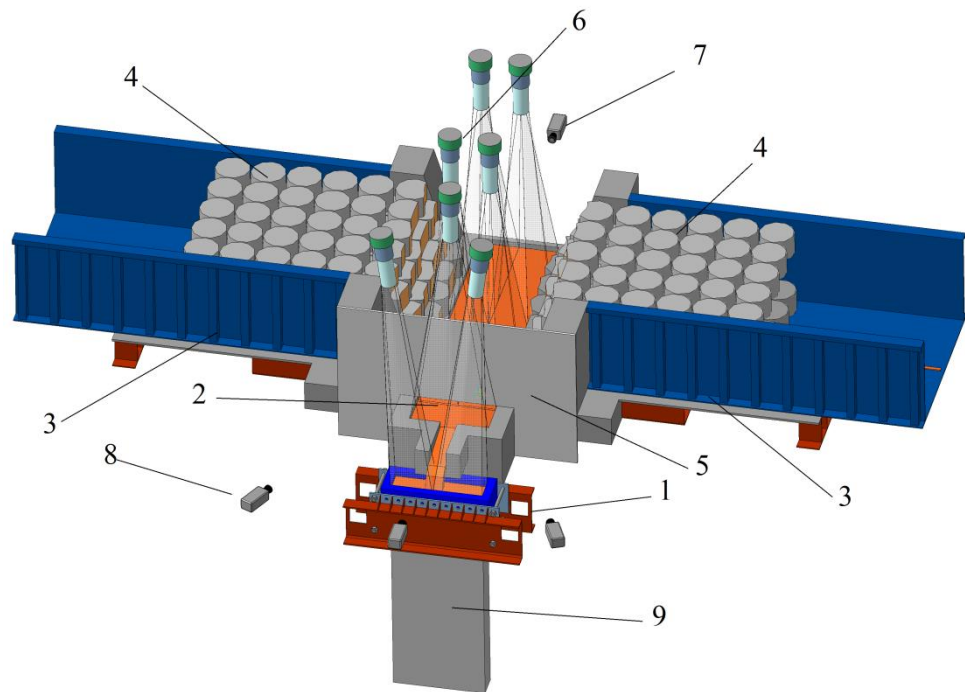
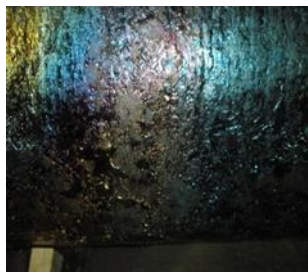


Рис. 1.3. Плавильна камера установки ВМО: 1 - кристалізатор; 2 – ПЄ; 3 – короб; 4 – шихта; 5 – екран; 6 – ЕПГ; 7 – камера відеоспостереження; 8 – камера контролю рівня ванни металу в кристалізаторі; 9 – зливков.

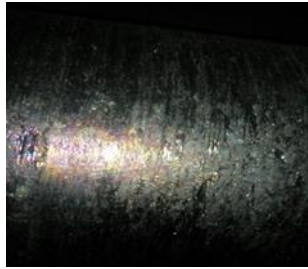
1.2. Аналіз причин утворення дефектів на поверхні зливку та існуючих способів витягування зливку з кристалізатора

1.2.1. Причини утворення дефектів на поверхні зливка при електронно-променевої плавці

Від коректної роботи системи витягування зливку з кристалізатора та плавності початку витягування залежить якість поверхні отримуваних зливків. При різкому початку витягування відбуваються тріщини щойнокристалізованого металу, а при повному застиганні зливку на поверхні утворюється так звана «гофрована поверхня» (рис. 1.4). Схема утворення гофрів при витягуванні зливку з кристалізатора представлена на рис. 1.5 [79].



а



б



в



г



д

Рис. 1.4. Дефекти зливку та їх усунення: а, б – каверни; в – гофрована поверхня; г – слід від зливного носка; д – обробка зливку на токарному верстаті

При витягуванні зливку 2 (рис. 1.5) механізмом витягування 1 з кристалізатора між ними виникають сили тертя. При початку руху кришка корона 5 частково руйнується з утворенням тріщин, каверн і гофрованих поверхонь. Поява корони 5 зумовлена недостатнім прогрівом розплаву 4 на краях кристалізатора, різким початком руху при витягуванні, дискретно-безперервним режимом витягування зливку з кристалізатора. В результаті цього структура зливку на поверхні і в середині різна. Глибина утворених дефектів досягає 20 мм

і для їх усунення необхідно додатково проводити токарну чи фрезерну обробку зливку (в залежності від форми кристалізатора). Оскільки за допомогою ЕПП частіше за все плавлять сплави на основі тугоплавких та надміцних металів (титан, молібден, ніобій та ін..) [81, 107, 128] то обробка таких зливків повинна виконуватись спеціальними дорогими надміцними інструментами. Крім того до 10% при обробці зливку йде у відходи [42, 98].

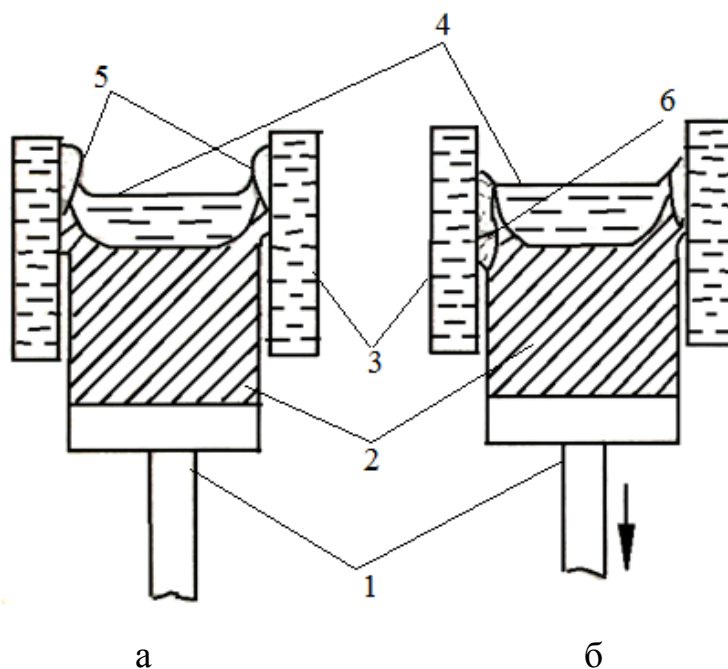


Рис. 1. 5. Схема утворення гофрованої поверхні при витягуванні зливка з кристалізатора: а – утворення корони над зливком при наплавленні; б – поява тріщин на поверхні зливка при витягуванні; 1 – механізм витягування зливку; 2 – зливок; 3 – кристалізатор; 4 – розплав металу; 5 – корона; 6 – тріщина, утворена під час витягування

Як було вище сказано, при витягуванні зливку з кристалізатора між поверхнею зливку та кристалізатором виникають сили тертя. В роботі [84] розрізняють силу $P_{\text{поч}}$, що виникає при початку витягування, а також силу тертя $F_{\text{тер}}$, що діє під час усталеної швидкості витягування; приводиться експериментальний графік зміни сил $P_{\text{поч}}$ та $F_{\text{тер}}$ (рис. 1.6) і емпіричні формули визначення середніх та максимальних значень сил тертя.

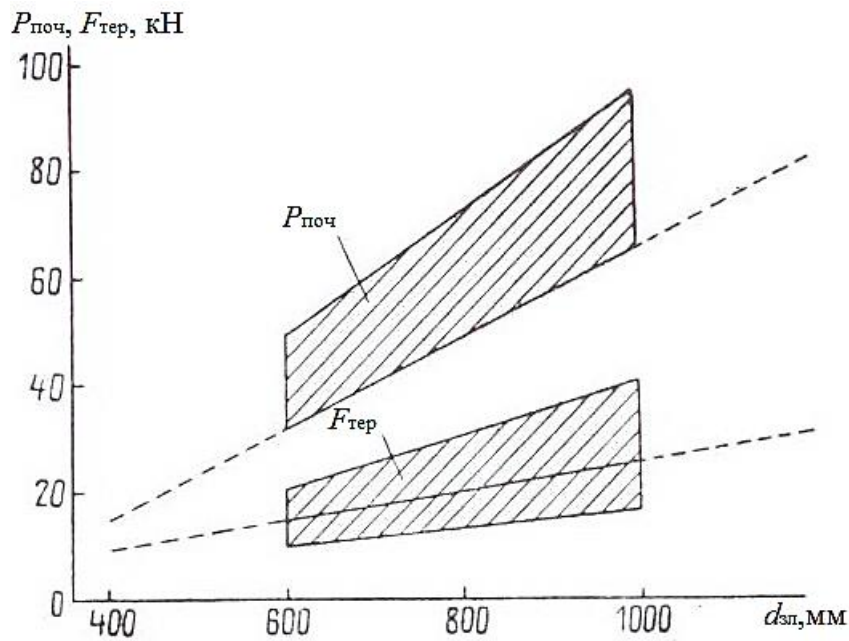


Рис. 1.6. Зміна сил тертя $P_{\text{поч}}$ та $F_{\text{тер}}$

$$F_{\text{тер.сер}} = 0,28d_{\text{зл}} - 2,5; \quad (1.1)$$

$$F_{\text{тер.мах}} = 0,5d_{\text{зл}} - 10; \quad (1.2)$$

$$P_{\text{поч.сер}} = 0,8d_{\text{зл}} - 17; \quad (1.3)$$

$$P_{\text{поч.мах}} = 1,17d - 22, \quad (1.4)$$

де $d_{\text{зл}}$ – діаметр зливку в кристалізаторі, мм; $P_{\text{поч}}$ та $F_{\text{тер}}$ – в кілоньютонках.

1.2.2. Способи витягування зливку з кристалізатора

Існують наступні способи витягування зливку з кристалізатора при ЕПП, які можна класифікувати за способом руху зливку при його витягуванні; за типом приводу витягування; за рівнем автоматизації систем визначення розплаву в кристалізаторі та витягування зливку з кристалізатора.

Зараз використовують такі способи руху зливку при витягуванні з кристалізатору:

- зливков, по мірі наплавлення, поступово витягують механізмом витягування в дискретно-безперервному режимі: після підвищення рівня рідкого металу в кристалізаторі на 10 ... 15 мм відносно допустимого верхнього рівня

зливков опускають з лінійною швидкістю $(2 \dots 3) \cdot 10^{-4}$ м/с до тих пір, поки розплав в кристалізаторі не опуститься до колишнього рівня [2, 91];

- зливков переміщують на невелику відстань вгору, а потім витягують вниз механізмом витягування в дискретно-безперервному режимі аналогічно попередньому методу [46];

- після зливу порції розплаву з ПЄ в кристалізаторі припиняють дію електронних променів, які обігрівають поверхню розплаву в області контакту зливку з кристалізатором, зливков витягують на половину висоти порції, обігрівання поверхні зливка в області контакту з кристалізатором поновлюється, а перед наступним зливом зливков витягують на наступну половину висоти порції [70];

- по мірі наплавлення зливков опускають вниз механізмом витягування в безперервному режимі [6];

- по мірі наплавлення зливков витягується в безперервному режимі і додатково подають на зливков коливання, в результаті чого поверхня зливку сприймає менші сили тертя по кристалізатору [79];

- при витягуванні зливку додатково надається обертальний рух [71].

Кожен з вище приведених способів руху має свої переваги та недоліки.

Способи з дискретно-безперервним рухом легко реалізувати за допомогою зубчатої та гвинтової передачі чи гідроциліндра. Але під час такого типу руху зливков на значний час зупиняється, розплав починає кристалізуватися на поверхні кристалізатора, але при цьому новоутворена поверхня сприймає додаткові сили тертя і при різкому початку витягування зливку руйнується з утворенням дефектів поверхні, так званих «гофрів».

При постійному витягуванні зливку сили тертя його поверхні по кристалізатору значно менші, але такий спосіб руху досить важко забезпечити, оскільки швидкість руху буде залежати від витрати розплавленого металу в кристалізатор.

Спосіб безперервного руху зливку з додатковим накладанням коливань є найбільш перспективним і дієвим, оскільки поверхня зливку сприймає незначні

сили тертя, але його використання має ті ж обмеження, що способи безперервного витягування зливку з кристалізатора.

1.2.3. Приводи витягування зливку з кристалізатора

В якості приводів витягування зливку з кристалізатора використовують:

- редуктор, який приводить в рух два гвинти з рухомою платформою зі штоком до якої кріпиться зливков за допомогою з'єднання «ластівчин хвіст» [91];
- гідравлічний циліндр [4];
- гідравлічний циліндр з планетарною рейковою передачею [5];
- механічну ланцюгову передачу [109].

Поєднання редуктора, який приводить в рух два гвинти з рухомою платформою є найбільш поширеним рішенням, оскільки за допомогою такого типу привода можна виплавляти зливки значної довжини (до 4м [45, 90]). Але в такому випадку початок руху при витягуванні буде дуже різким і сили тертя зливку по кристалізатору в початковий момент будуть в 2...2.5 рази більше ніж потім при стаціонарному русі. Результатом різкого початку витягування будуть розриви на поверхні зливку та гофрована поверхня.

Використання гідравлічного циліндру [4] в якості приводу для витягування зливку з кристалізатора забезпечує більш плавний початок руху при витягуванні, можливість регулювання швидкості витягування зливку в широкому діапазоні. Але використання гідравлічного циліндру має обмеження, яке пов'язане з довжиною зливку, оскільки довжина гідравлічного циліндру в витягнутому положенні приблизно в 2 рази більша довжини зливку. Крім цього до ущільнень гідравлічного циліндра приймаються жорсткі вимоги, оскільки він працює в середовищі з підвищеними температурами.

При використанні гідравлічного циліндру з планетарною рейковою передачею [3] обмеження по габаритам зливку зменшено, оскільки при переміщенні гідроциліндра рухомий блок зубчатих коліс перекочується в ту саму сторону, але з більшою швидкістю, що забезпечує піддону зі зливком більше

переміщення ніж штоку гідроциліндра. Але при такому технічному рішенні залишаються жорсткі вимоги до ущільнень гідроциліндра. Є можливість утворення люфту в планетарній передачі, що призведе до неузгодженості в роботі гідроциліндру з планетарною рейковою передачею.

1.2.4. Датчики визначення рівня розплаву в кристалізаторі

Для визначення рівня розплаву в кристалізаторі використовуються теплові [1], акустичні [11, 26] та оптичні датчики [2].

Для виміру рівня розплаву в кристалізаторі використовуються як датчики безпосереднього відліку поточного значення рівня розплаву, та і дискретні сигналізатори, що фіксують певне значення рівня [10, 11]. Два ультразвукових датчика встановлюють вертикально на зовнішній поверхні кристалізатора (рис. 1.7 [11]). Якщо кристалізатор порожній, то відбиття ультразвукових хвиль відбувається безпосередньо від тієї стінки кристалізатора, через яку була направлена ультразвукова хвиля. При повному кристалізаторі, відбиття цих хвиль відбувається на його протилежній стінці після проходження через розплавлений метал.

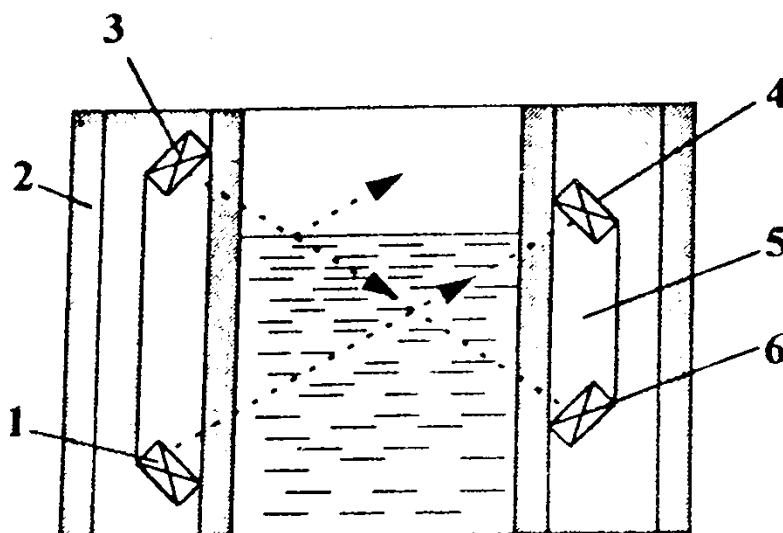


Рис. 1.7. Акустичний рівнемір безперервної індикації: 1, 3 – випромінюючі ультразвукові датчики; 2 – стінка кристалізатора; 4, 6 – прийомні ультразвукові датчики, 5 – рухома каретка [26]

Також в якості датчиків рівня розплаву в кристалізаторі при ЕПП використовується чорно-біла відеокамера, яка встановлюється навпроти кристалізатора і відслідковує розділ яскравої рідкої фази розплаву та темної зони стінки кристалізатора [91].

1.2.5. Системи керування приводом витягуванням зливку з кристалізатора

Найбільш простий спосіб витягування зливку виконується безпосередньо оператором, який подає керуючий сигнал на електродвигун, що передає крутний момент на редуктор, а потім на гвинтову передачу, що в свою чергу переміщує зливки вниз. Оператор періодично, коли рівень розплавленого металу досягає деякого верхньої межі, подає сигнал на переміщення механізму витягування. Витягування припиняється, коли рівень металу досягає бажаного нижнього рівня [107].

Автори [26] приводять автоматичну систему регулювання (рис. 1.8), до якої входять механізм подачі 1 заготовки 2, яка сплавляється в зону дії ЕПП 3, механізм витягування зливку 6, датчик 5 та регулятор рівня 4.

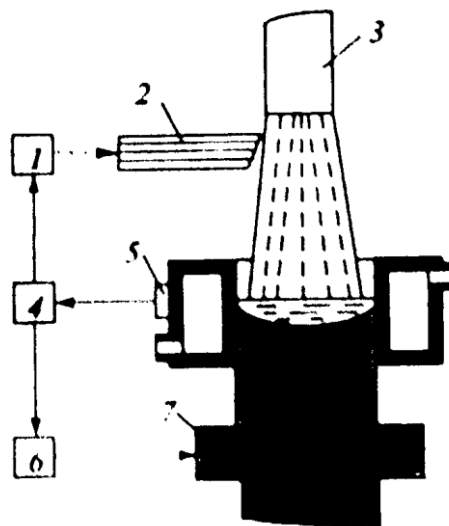


Рис 1.8. Автоматична система регулювання рівня металу в кристалізаторі при ЕПП: 1 – механізм подачі заготовки; 2 – заготовка; 3 – ЕПП, 4 – регулятор рівня; 5 – датчик рівня; 6 – механізм витягування зливку [26]

Коли рівень розплаву металу в кристалізаторі відповідає необхідному заданому, швидкість витягування зливка із кристалізатора постійна. При рівні більшому, ніж заданий, регулятор рівня 4 зменшує швидкість подачі заготовки, що переплавляється. При рівні нижчому, ніж заданий, регулятор 4 зменшує швидкість витягування зливка. Змінення цих швидкостей відбувається поки рівень металу зрівняється з заданим.

На даний момент на ЕПУ ТІСО-15М та типу ВМО використовується комп'ютерна телевізійна системою контролю та стабілізації рівня розплаву в кристалізаторі, яка забезпечує найкращі умови для роботи оператора (рис. 1.9) [2, 91].

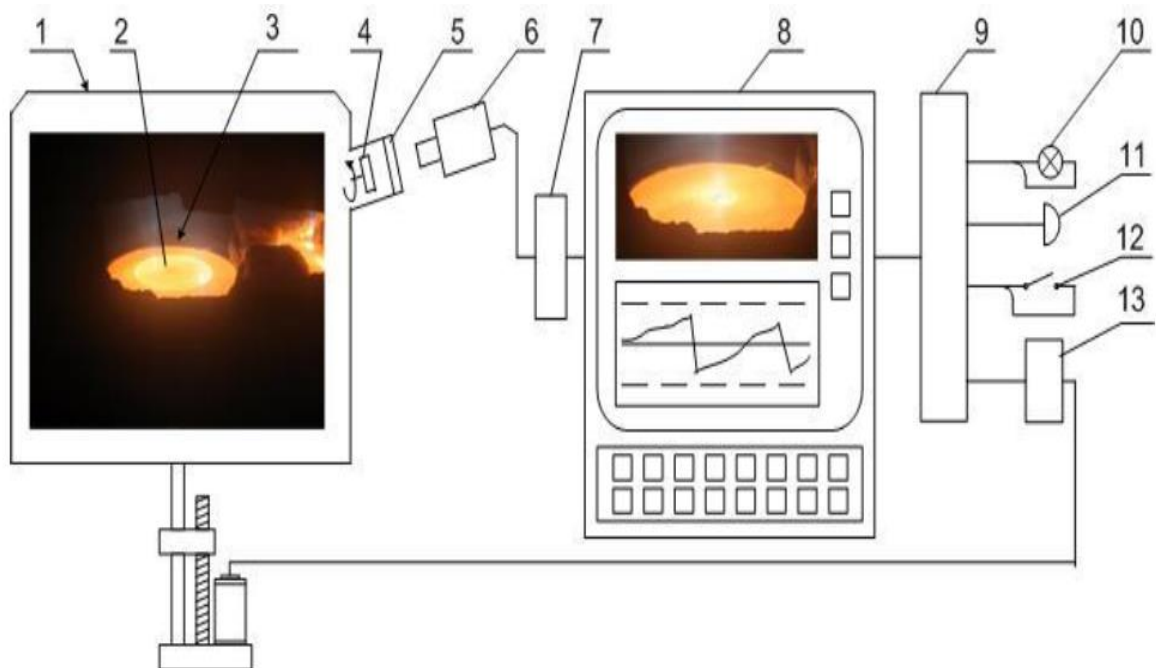


Рис. 1.9. Схема комп'ютерної телевізійної системи контролю та стабілізації рівня розплаву в кристалізаторі: 1 – плавильна камера; 2 – розплав металу; 3 – кристалізатор; 4 – стробоскопічна система; 5 – оглядове вікно; 6 – відеокамера; 7 – прилад відеозахоплення; 8 – промисловий комп'ютер; 9 – контролер; 10 – світлова аварійна сигналізація; 11 – звукова аварійна сигналізація; 12 – перемикач «Автомат / Ручний режим»; 13 – контролер приводу витягування зливку [91]

Контроль рівня рідкого металу полягає в визначенні межі розділу між світлою поверхнею розплаву металу 2 і темною стінкою кристалізатора 3. Спостереження ведеться через оглядове вікно 5 встановленою зовні плавильної камери 1 відеокамерою 6. Для оберігання від запилення скла оглядового вікна застосована стробоскопічна система 4. Сформований відеокамерою відеосигнал надходить на пристрій відеозахоплення 7 промислового комп'ютера 8. Промисловий комп'ютер 8 виділяє з кадру зону інтересу, фільтрує зображення, створює бінарне зображення ванни розплаву, виділяє кордон ванни, розраховує відстань поверхні ванни від верхнього зрізу кристалізатора, відображає всю поточну інформацію на екрані монітора і записує її в сформовані пристроєм зв'язку з об'єктом 9 сигнали, які надходять на контролер приводу витягування зливка 13. Використовується світлова 10 і звукова 11 аварійна сигналізація системи, а також перемикач 12 "Автомат / Ручний режим" для вибору режиму регулювання рівня розплаву в кристалізаторі.

Проведений аналіз існуючих систем витягування зливку з кристалізатора дозволяє запропонувати класифікацію способів витягування зливку з кристалізатора (рис. 1.10) по рівню автоматизації, по типу приводу витягування та по закону руху вихідної ланки приводу, що може бути використана при розробці нових та вдосконаленні існуючих систем витягування з урахуванням переваги та специфіки кожного зі способів.

1.3. Визначення розподілу температур розплаву в проміжній ємності чисельними методами

Під час технологічного процесу ЕПП титану та сплавів на його основі важливим є дотримання температури розплаву в необхідних межах. Для цього необхідно коректно керувати траєкторіями руху електронного променя ЕПГ, а також постійно вимірювати розподіл температур розплаву в ПЄ.

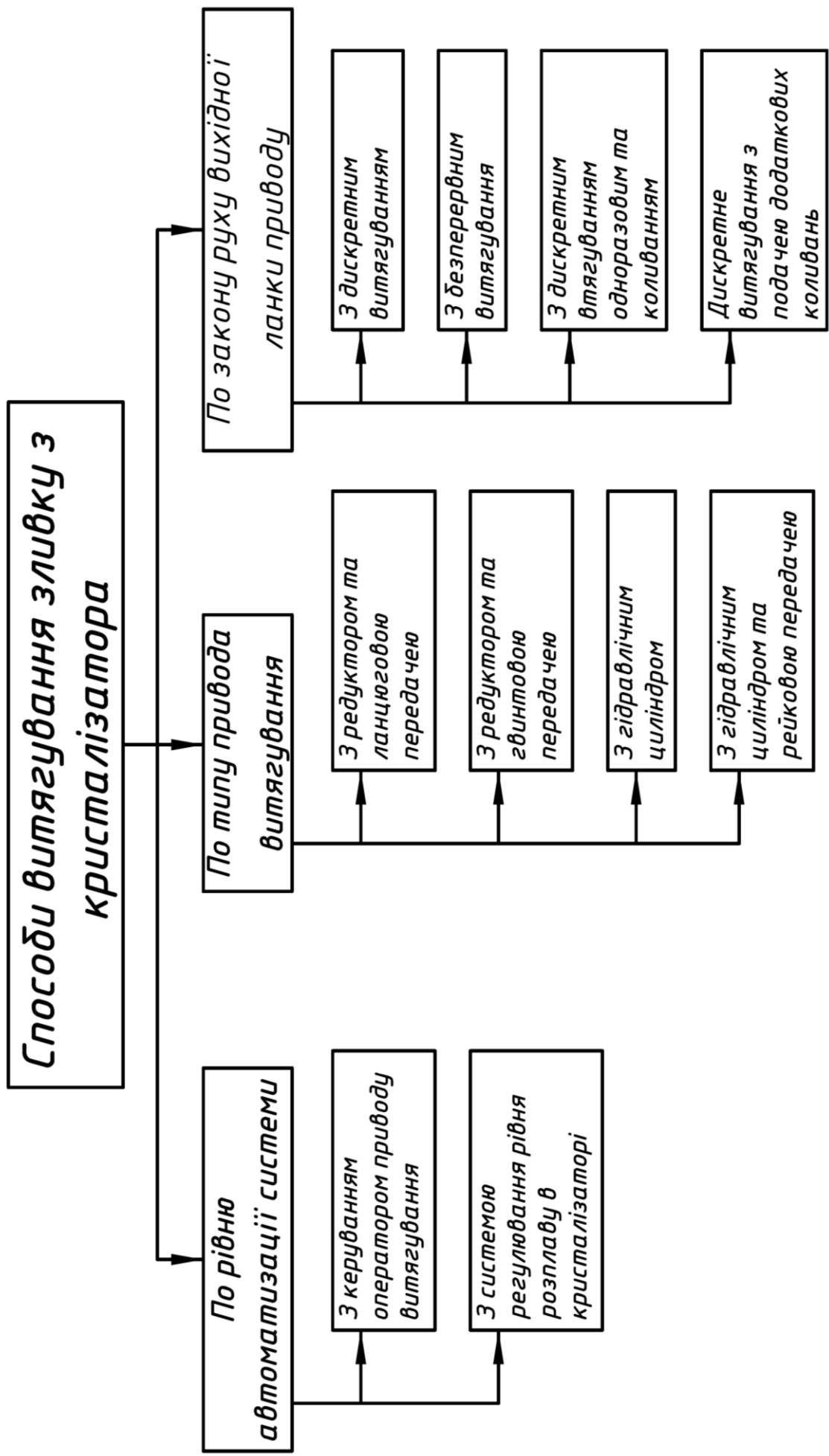


Рис. 1.10. Класифікація способів витягування зливку з кристалізатора

В випадку перегріву вище допустимої температури з ПЄ метал будуть інтенсивно випаровуватись легуючі домішки [13]. При плавлі титанових сплавів з алюмінієм (Ti-6Al-4V) [77] в результаті небажаного перегріву з розплаву крім титану випаровується алюміній, що може призвести до недотримання стандартів по хімічному складу сплаву.

У випадку недогріву розплаву до необхідної температури, процес рафінування розплаву буде проходити повільно. У розплаві залишиться значна кількість карбідів та нітридів, які при кристалізації зливку будуть утворювати в решітці металу концентратори напружень, що в свою чергу призведе до погіршення якості виплавленого сплаву. Крім цього, при недостатньому прогріві ПЄ шматки шихти, що падають в неї, можуть не повністю розплавитися і в твердому стані потрапити в кристалізатор. В такому випадку в зливку також будуть утворюватися концентратори напружень.

Рекомендована технологічна температура для розплаву титану при рафінуванні в ПЄ вважається 2200 К [109], але на практиці в установці ТІСО-15М температура в ПЄ підтримують на рівні 1950...2000 К і температуру в плавильній камері не вимірюють [99].

Методи вимірювання температури розплаву металів принципово поділяються на дві групи [106]:

- опосередкований – по різним зовнішнім ознакам;
- прямий – за допомогою вимірювальних пристроїв.

Опосередковані методи не забезпечують високої точності і можуть використовуватись тільки як додаткові.

Методи прямого вимірювання засновані на безпосередньому вимірюванні температур розплаву (за допомогою термопар) чи на визначенні інтенсивності випромінювання (за допомогою пірометра) [95].

Недоліком використання термопар при визначенні температури розплаву в ПЄ є можливість її пошкодження електронним променем, а також те що вимірювання робиться тільки в одній точці і неможливо виміряти нерівномірність прогріву по всій поверхні ПЄ.

Принцип роботи пірометрів випромінювання базується на законах теплового випромінювання [43, 60]. Усі пірометри випромінювання градууються за стандартним випромінювачем - моделлю абсолютно чорного тіла.

При використанні пірометрів в металургії вдається точно визначати температуру в замкнутому просторі високотемпературних печей і в результаті цього покращувати якість своєї продукції [59]. Якщо температуру стінки печі або об'єкт контролю вимірюють через технологічні отвори, то за допомогою пірометрів часткового випромінювання або візуальних пірометрів в більшості випадків вдається досить точно виміряти температуру стінок печі або об'єкта, якщо його температура близька до температури стінок печі, причому правильні результати отримують лише в тому випадку, якщо в полі зору пірометра немає парів або твердих частинок, що поглинають випромінювання і впливають на точність вимірювання газів.

При майбутній розробці алгоритмів керування траєкторією руху електронного променя при обігріві розплаву в ПЄ необхідно проводити аналіз моделювання теплового стану розплаву в ПЄ.

Існує ряд робіт присвячених визначенню температури розплаву при ЕПП. В роботі [109] розглядається стаціонарний теплообмін в ПЄ і розраховується середня температура по об'єму розплаву. Однак, така постановка не враховує зміну температури в часі, а також нерівномірність температурних полів розплаву в ПЄ.

В роботах [134-136] запропонована двовимірна стаціонарна модель нагріву розплаву. Теплопровідність описується в циліндричній системі координат. Температурні поля, отримані за допомогою моделі, показують області переходу розплав-зливков. Однак, використання такої моделі для розрахунку теплообміну в ПЄ не враховує геометрію досліджуваної області та нестационарність теплового процесу.

В роботах [114, 115, 117, 124, 126, 127] представленні нестационарні тривимірні моделі теплообміну при електронно-променевої плавці. Вони мають

обмежене використання, оскільки описують нестационарний теплообмін розплаву в області дії променя, а не в усій ПЄ, а також не враховують гідродинаміку процесу [119, 120, 137, 138].

Робота [86] присвячена визначенню оптимальних режимів роботи ЕПГ. Використана модель розрахунку температур є двовимірною і стаціонарною з врахуванням течії розплаву. Вона описує теплообмін на поверхні ПЄ без врахування впливу на теплообмін нижніх шарів розплаву, а також не враховує зміну температури в часі.

В роботі [113] розглядається тепло-масообмін в ПЄ при русі електронного променя по її поверхні з використанням методів скінченних елементів та програмного пакету COMSOL Multiphysics. Але при моделюванні обігріву променя не враховується експоненціальний характер розподілу потужності теплового потоку променя ЕПГ. Також використання такого програмного пакету не дає можливості моделювання алгоритмів керування рухом електронного променя.

Виходячи з проведеного аналізу актуальною є розробка тривимірної моделі нестационарного теплообміну в ПЄ ЕПУ з урахуванням течії розплаву та аналізу впливу її параметрів.

1.4. Аналіз існуючих систем керування розподілом потужності на поверхні розплавленого металу шляхом зміни положення променя електронно-променевої гармати

Окрім складнощів визначення температури розплаву в ПЄ є значний розкид часу на виплавку зливку однакової довжини різними операторами. Керування роботою ЕПГ включає в себе: регулювання потужності кожної з ЕПГ, а також задання програми траєкторії променя з декількох стандартних програм керування для кожної ЕПГ [26, 100]. Тобто увесь процес керування гарматами залежить тільки від досвіду та суб'єктивної враження оператора, який спостерігає за плавкою протягом зміни в 2 години. В зв'язку з довготривалістю

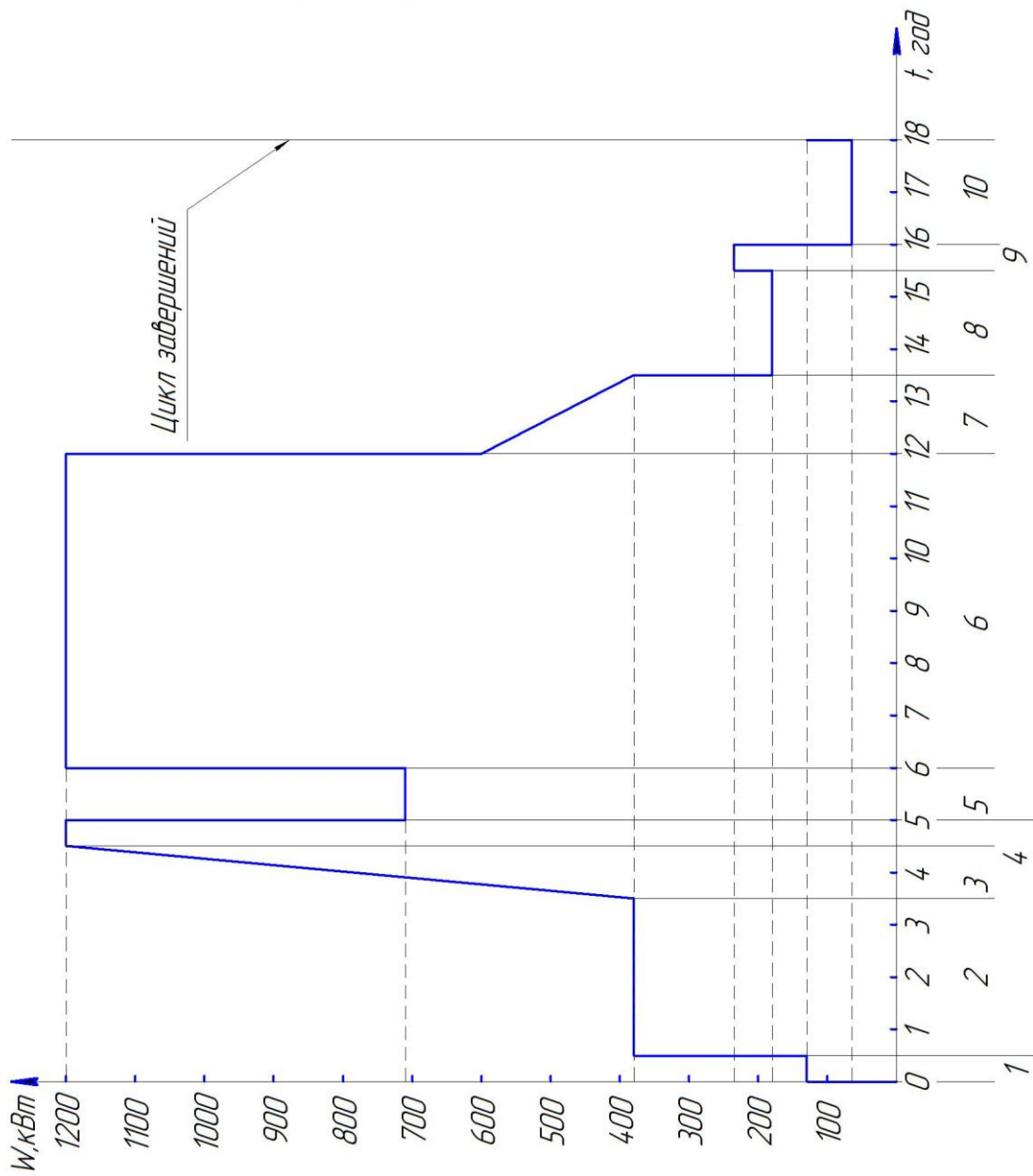
процесу, оператор сприймає значне фізичне навантаження, з часом він втомлюється, концентрація уваги падає, що може призвести до помилок в процесі плавки, які зумовлюють погіршення якості зливку та додаткові витрати на обробку [33].

На рис. 1.11 приведена діаграма технологічного споживання електроенергії під час виплавки титанового зливку масою 3 т на промисловій установці ТІСО-15М [34]. Проаналізувавши діаграму, можна зробити висновок, що зменшення часу усього процесу можливо тільки зменшивши час процесу б (наплавлення зливку), оскільки тільки цей процес є неоднозначним (залежить від кваліфікації оператора, форми та складу шихти, яка подається, від швидкості її подачі та ін.) і його умови можуть змінюватися, на відміну від усіх інших процесів, які виконуються завжди з однаковою затратою електроенергії.

Як підтвердження неоднозначності процесу, були проаналізовані данні 16 виплавок титанових зливків діаметром 650 мм і довжиною до 1.608 м (мінімальна довжина зливка 16-ти плавок). Розкид часу для наплавлення зливку представлено на рис 1.12. Розкид часу складає 88 хвилин, чи $\approx 14\%$ відносно середнього значення [34, 37].

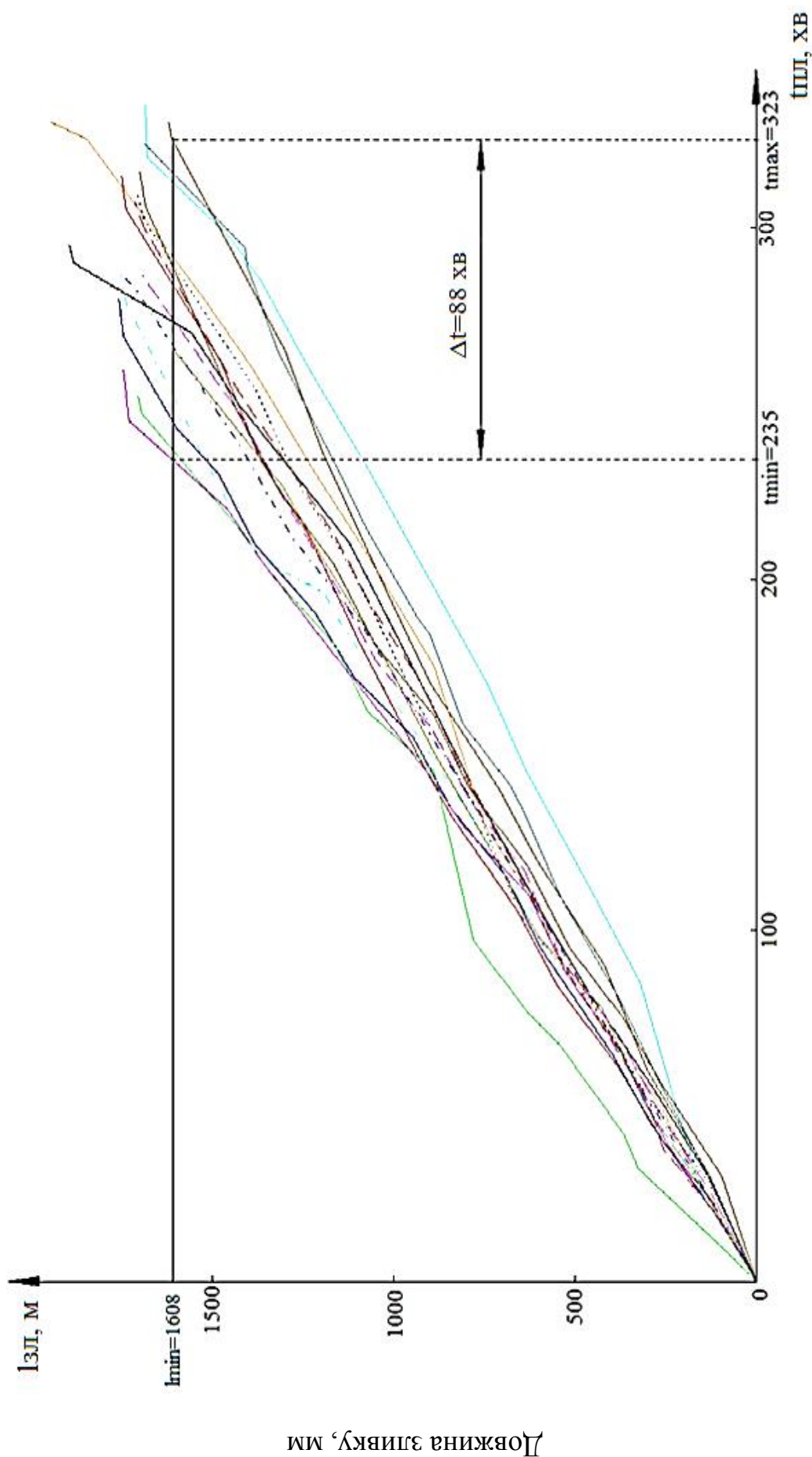
В ЕПУ типу ТІСО-15М та ВМО для плавлення шихтового матеріалу використовуються газорозрядні гармати високовольтного тліючого розряду з холодним катодом [93, 94]. Конструктивно газорозрядна ЕПГ (рис. 1.13) [29] складається з катодного вузла 1, анодного вузла 2, ізолятора 3, променевода 4 з двома фокусними котушками 5 та котушкою відхилення 6.

Під час роботи ЕПГ в розрядну камеру через пневмоклапан подається підготовлена суміш водню і кисню. В результаті дії прискорюючої напруги між катодом і анодом виникає високовольтний тліючий розряд з плазмою, яка локалізована в порожнині катодно-анодного вузла та відокремлений від катода областю катодного падіння потенціалу.



1. Завантаження шихти
2. Вакуумізація установки
3. Вихід на режим гармат
4. Формування заправки зливку
5. Час витримки
6. Наплавлення зливку
7. Вивід усадочної раковини
8. Охолодження зливку
9. Вивантаження зливку
10. Чистка установки

Рис. 1.11. Споживання електроенергії під час технологічного циклу виплавки титанового зливку масою 3 т на ЕПУ



Час виплавки зливку, хв

Рис. 1.12. Розкид часу виплавки титанових зливків довжиною 1.608 м

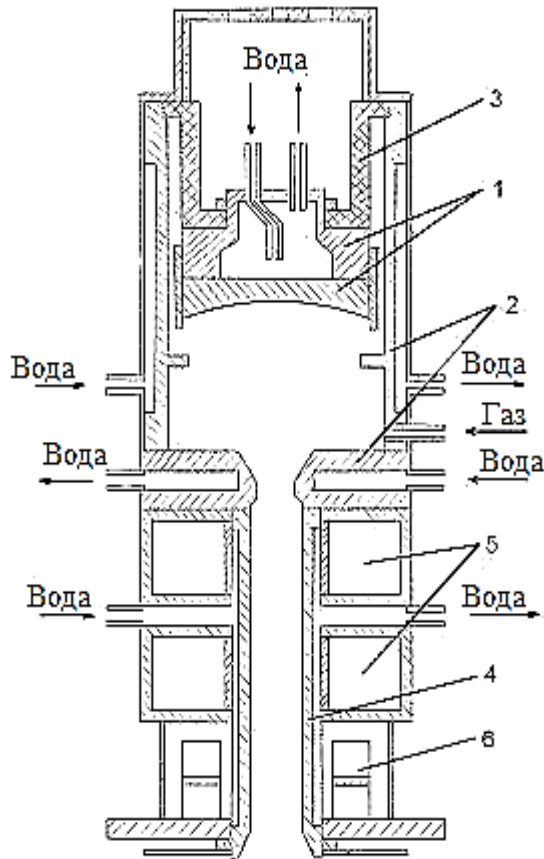


Рис. 1.13. Конструктивна схема газорозрядної ЕПГ серії ВТР: 1 – катодний вузол; 2 – анодний вузол; 3 – ізолятор, 4 – променевод; 5 – фокусні котушки; 6 – котушка відхилення

При великих потужностях електронного променя (більше 60 кВт) [107] діаметр плями променя на поверхню металу, що плавиться, чи розплаву змінюється в межах 25-30 мм. Такий розмір менше розміру поверхні шматків шихти чи дзеркала розплаву. Тому для необхідного розподілу потужності променя між розплавом та шихтою використовують програмну розгортку променя для ЕПГ.

Більш ефективним є програмування ЕПГ коли кожна з них відповідає за певну зону дзеркала розплаву. Загальна програма складається з декількох підпрограм [65]. Наприклад одна ЕПГ забезпечує нагрів, розплав і рафінування металу в зоні ПЄ. Потужність другої ЕПГ підводиться до поверхні розплаву в кристалізаторі для зменшення поверхневого натягу розплаву, який починає

кристалізуватись. Також друга ЕПГ періодично повинна прогрівати зливний носок для вільного стікання розплаву з ПЄ в кристалізатор.

Як приклад, в роботах [66, 67] приводяться алгоритми керування ЕПГ ЕПУ МВ-1 для плавки молібдену, яка за кількістю гармат та їх розміщенням подібна до ТІСО-15М.

Кожна з ЕПГ має набір необхідних програм, які виконуються у вигляді різних розгорток електронних променів в межах заданих параметрів та моделюванням розподілів потужності в відповідності з необхідним технологічним режимом, який вибирається оператором установки.

Блок керування ЕПГ забезпечує наступні режими [67]:

- «точка» – фокусування променів в точці;
- «кільце» – фокусування променів в кільцеподібну розгортку;
- «прогрів ємності» – прогрів прямокутної площадки;
- «прогрів кристалізатора» – формування послідовних концентричних кіл різного діаметра для покриття поверхні кристалізатора;
- «частота» – режим при якому вибирається необхідна частота повторення розгортки (діапазон частот регулюється формуванням розгортки від 1 до 200 Гц);
- «центр» – перехід розгортки в центр.

1.5. Мета та задачі дослідження

На основі проведеного аналізу робіт поставлена *мета дисертаційної роботи*: підвищення ефективності процесу виготовлення титанових зливків, а саме зниження питомих енерговитрат та збільшення продуктивності виплавки шляхом розробки механотронної системи керування виплавою титану при електронно-променевої плавці.

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання наступних задач:

1. Провести аналіз резервів підвищення ефективності процесу виготовлення титанових зливків при електронно-променевої плавці.

2. Провести аналіз резервів підвищення ефективності процесу виготовлення титанових зливків при електронно-променевої плавці.

3. Теоретично обґрунтувати застосування механотронної системи керування виплавою титана зі зворотним зв'язком по температурі розплаву в проміжній ємності і по рівню розплаву в кристалізаторі.

4. Дослідити вплив швидкості течії розплаву, потужності обігріву електронно-променевої гармати, коефіцієнту розподілу потужності обігріву по поверхні проміжної ємності та алгоритмів керування рухом електронного променя на витрату розплаву з проміжної ємності в кристалізатор.

5. Науково обґрунтувати та розробити спосіб витягування титанового зливку з кристалізатора та конструкцію приводу двосторонньої дії для подачі на зливки додаткових коливань.

6. Розробити інженерну методику вибору раціональних геометричних параметрів приводу подачі додаткових коливань на основі дослідження впливу його конструктивних параметрів на довговічність.

7. Оцінити ефективність механотронної системи керування виплавою титану зі зворотним зв'язком по температурі розплаву в проміжній ємності та по рівню розплаву в кристалізаторі.

Об'єкт дослідження – процес виготовлення титанових зливків при електронно-променевої плавці.

Предмет дослідження – механотронна система керування електронно-променевою виплавою титану.

Для проведення подальших досліджень обрані ЕПУ типу ТІСО-15М та ВМО, як такі, що мають найвищий рівень автоматизації.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ МЕХАНОТРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВИПЛАВКОЮ ТИТАНУ ЗІ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ ПО ТЕМПЕРАТУРІ РОЗПЛАВУ ТА ПО РІВНЮ РОЗПЛАВУ В КРИСТАЛІЗАТОРІ

Теоретично обґрунтовано створення механотронної системи керування виплавною титану зі зворотним зв'язком по температурі розплаву в ПЄ та по рівню розплаву в кристалізаторі та розроблено математичну модель процесу плавки в ПЄ ЕПУ на прикладі ТІСО-15М. Досліджено залежність середньої температури розплаву та відносного розплавленого об'єму титану в ПЄ від технологічних параметрів плавки.

2.1. Функціональна схема механотронної системи керування виплавною титану

На основі проведених досліджень в розділі 1 запропонована нова механотронна система керування виплавною титану, принципова схема якої представлена на рис. 2.1.

Запропонована система керування складається з бункеру з шихтою 1 та механізму подачі шихти 2, який поступово подає її в ПЄ 3, де вона оплавляється ЕПГ 4, розплав рафінується і стікає в кристалізатор 5, де також відбувається обігрів ЕПГ 6. При досягненні розплавом максимального допустимого рівня в кристалізаторі зливки витягується механізмом витягування 7. Зворотний зв'язок по температурі розплаву титану в ПЄ реалізується за допомогою тепловізора 8, встановленого поза плавильною камерою над ПЄ, та по рівню розплаву в кристалізаторі – за допомогою відеокамери 9, встановленої на оглядове вікно з стробоскопом навпроти кристалізатора. Усі вхідні та вихідні сигнали поступають та виходять з блоку керування 10.

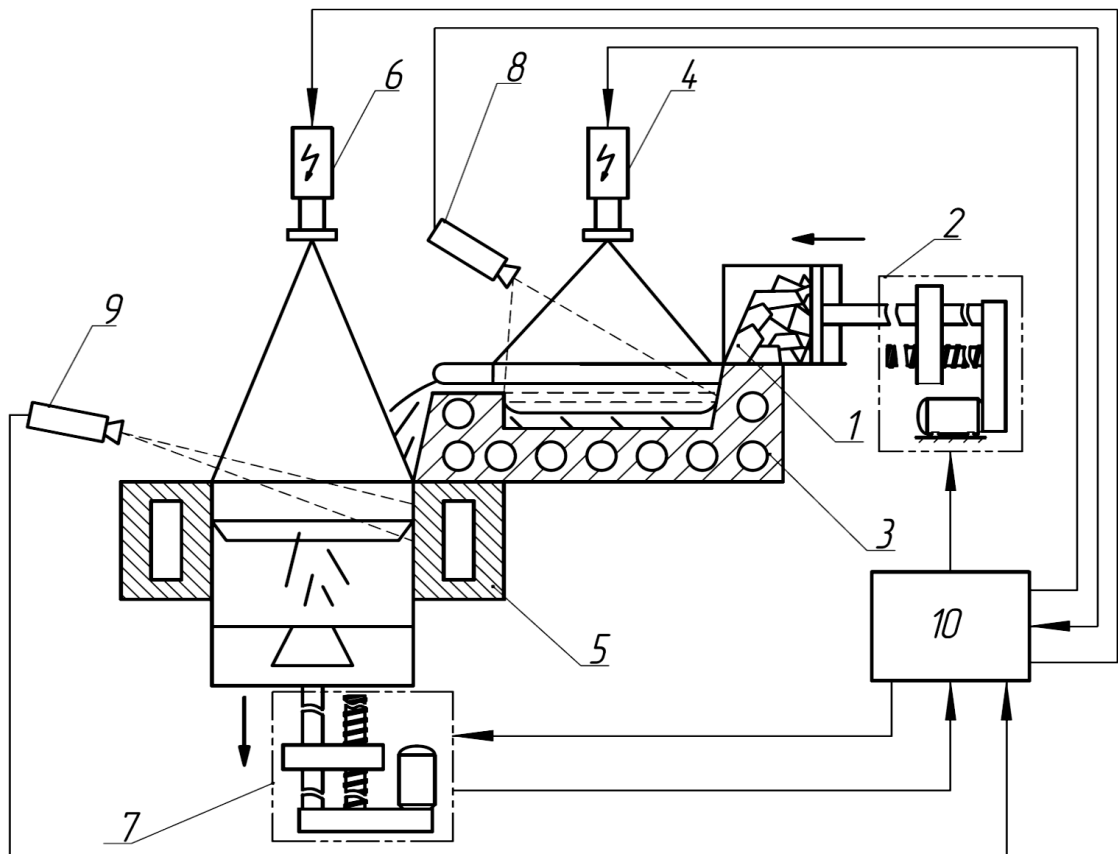


Рис. 2.1. Принципова схема механотронної системи керування виплавою титану: 1 – бункер з шихтою; 2 – механізм подачі шихти; 3 – ПЄ; 4,6 – ЕПГ; 5 – кристалізатор; 7 – механізм витягування зливку; 8 – тепловізор; 9 – відеокамера рівня розплаву; 10 – блок керування

Всю механотронну систем керування виплавою титану можна умовно розбити на три контури керування, які впливають на роботу кожного наступного (рис. 2.2): 1 – контур керування траєкторією руху ЕПГ; 2 – контур витягування зливку з кристалізатора; 3 – контур керування подачею шихти в зону плавки.

В контурі керування траєкторією руху електронного променю об'єктом, що визначає всю його роботу є ПЄ, в якій шихтовий матеріал оплавляється і поступово стікає в кристалізатор. Витрата розплаву з ПЄ в кристалізатор залежить від температури розплаву, а отже і від раціонального розподілу потужності ЕПГ по поверхні ПЄ.

Раціональний розподіл обігріву по поверхні ПЄ забезпечується завдяки врахуванню зворотного зв'язку по температурі поверхні розплаву, який

реалізується з використанням тепловізора, який захоплює зображення, оцифровує його і передає на блок керування ЕПГ. Інформація в блоці керування переводиться в числові масиви і на основі заданих алгоритмів задається траєкторія руху ЕПГ. Таким чином забезпечується необхідна витрата розплаву в кристалізатор, що відповідає рекомендованому діапазону для коректної роботи приводу витягування зливку з кристалізатора та забезпечення якісної поверхні зливків.

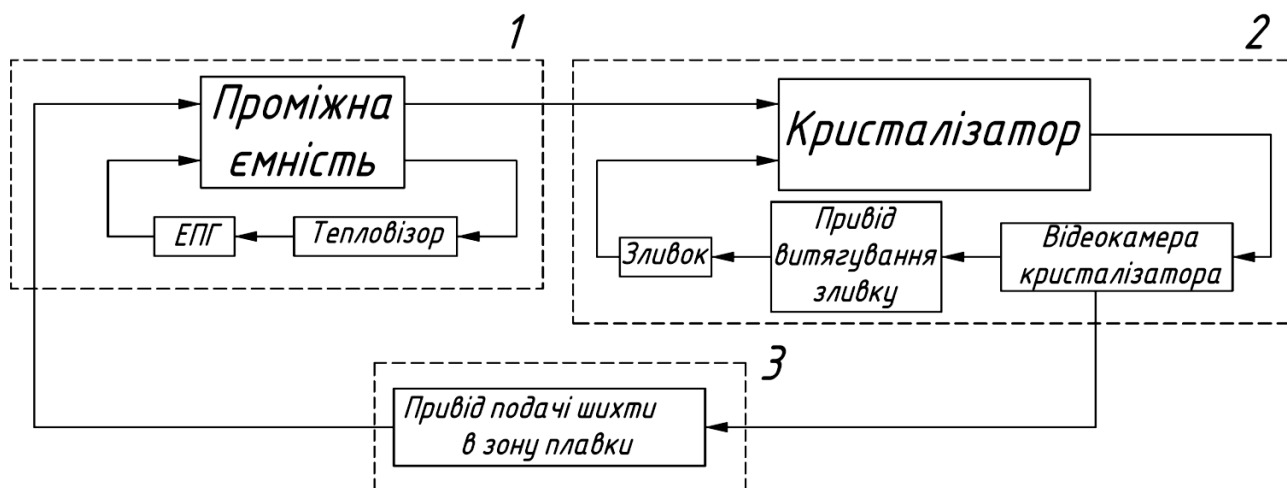


Рис. 2.2. Схема взаємозв'язків контурів керування технологічного обладнання

В контурі витягування зливку з кристалізатора рівень титанового розплаву відносно ободу кристалізатора визначає всю роботу контуру. Після стікання з ПЄ в кристалізатор розплав поступово переходить в тверду фазу і по мірі наплавлення зливок необхідно витягувати. Відеокамера рівня розплаву в кристалізаторі відслідковує мінімальний та максимальний рівень розплаву в кристалізаторі і при досягненні максимального подається сигнал на привід витягування зливку з кристалізатора (рис. 2.3), який складається з електродвигуна 1, редуктора 2 та гвинтової передачі 3. При досягненні мінімального допустимого рівня витягування припиняється.

На контур керування подачі шихти також подається сигнал про початок витягування і контур керування по частоті подачі сигналів на витягування періодично обчислює витрату титанового розплаву з ПЄ в кристалізатор. На

основі отриманих обчислень та заданих алгоритмів контур керування подає керуючий сигнал на привід подачі шихти в ПЄ (рис 2.4), який принципово подібний до приводу витягування зливку з кристалізатора.

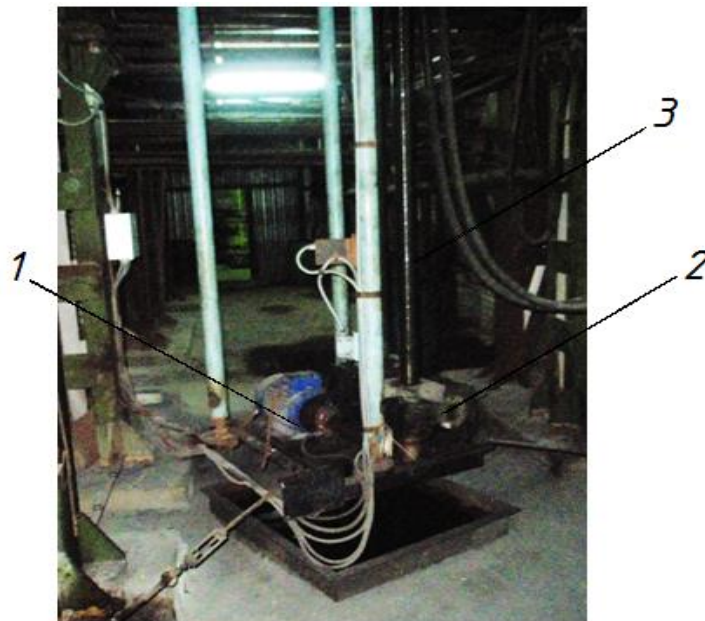


Рис. 2.3. Привід витягування зливку з кристалізатора: 1 – електродвигун; 2 – редуктор; 3 – гвинтова передача

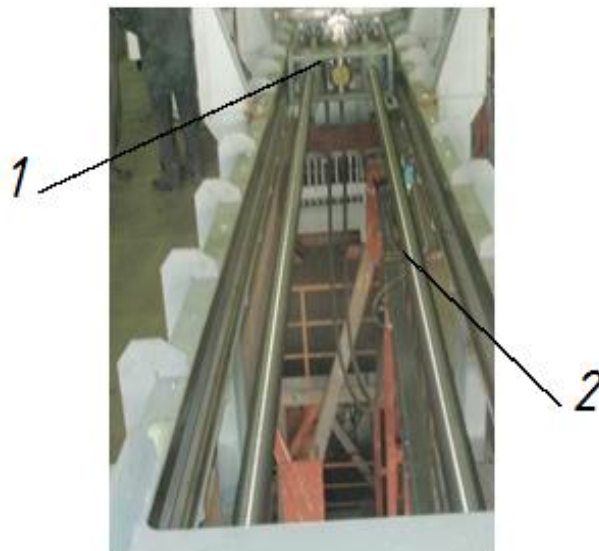


Рис. 2.4. Привід подачі шихти в зону плавки: 1 – редуктор; 2 – гвинтова передача

Як висновок – механотронна система керування виплавою титану має функціональну залежність $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$, в якій кожен контур керування має безпосередній вплив на наступний (рис. 2.2).

Аналіз ЕПУ показав, що найнестійкішим елементом механотронної системи є ПЄ, в якій відбуваються випадкові процеси потрапляння шихти в розплав, що впливає на витрату розплаву в кристалізатор та витягування зливку з нього. Тому визначення процесів в ПЄ дозволяє узгодити роботу всіх контурів керування.

З метою розробки механотронної системи керування виплавою титану необхідно створити тривимірну математичну модель процесу в ПЄ з урахуванням зміни швидкості течії розплаву та координат джерела обігріву в процесі моделювання для забезпечення зворотного зв'язку по температурі. Використовуючи таку математичну модель можливо досліджувати залежності зміни теплового стану розплавленого титану від таких параметрів як швидкість течії розплаву, потужності обігріву ЕПГ та її розподілу по поверхні ПЄ та ін.

2.2. Формалізована математична модель процесу в проміжній ємності

Розглянемо теплові та гідродинамічні процеси, що відбуваються в ПЄ. На рис. 2.5 представлено поле швидкостей в початковій області ПЄ отримане в програмному пакеті ANSYS. В роботі [102] було встановлено, що поле швидкостей течії розплаву в ПЄ ЕПУ ТІСО-15М в початковій області практично однорідне. Для спрощення гідродинамічної задачі, яка пов'язана зі зміною значення і напрямку течії розплаву в ПЄ, пропонується моделювати процес тепло-масообміну та течії розплаву в області з постійною швидкістю і прямолінійною течією (рис. 2.5, виділена область). В подальшому під терміном «досліджуваний об'єм» та ПЄ буде розумітись вищевказана область.

На рис. 2.6 представлена розрахункова схема процесу, що відбуваються в ПЄ.

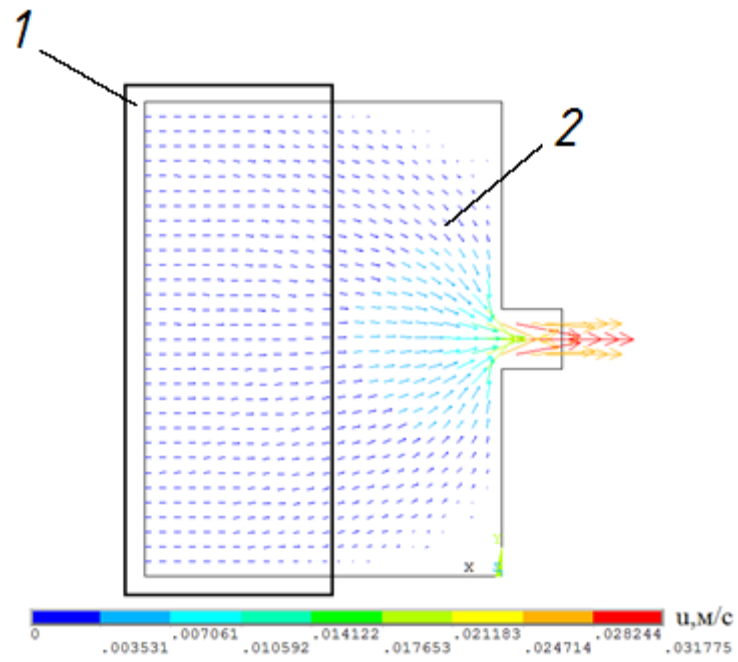


Рис. 2.5. Розподіл швидкостей течії розплаву в ПЄ: 1– область постійної швидкості течія та напрямку розплаву; 2 – область змінної швидкості течії та напрямку розплаву

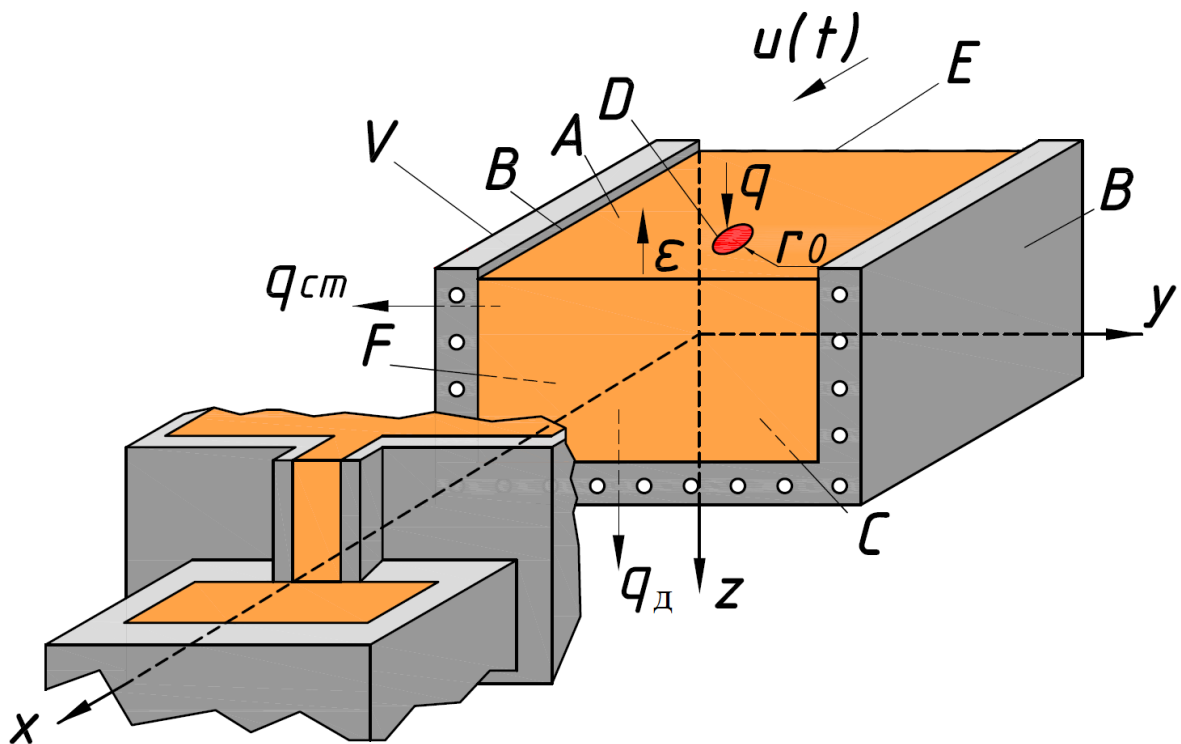


Рис. 2.6. Розрахункова схема процесу в ПЄ

В досліджуваному об'ємі V зі змінною в часі швидкістю $u(t)$ вздовж осі X тече титановий розплав. Теплофізичні властивості розплаву: коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К); питома ізобарна теплоємність c_p , Дж/(кг·К) та густина ρ , кг/м³. В початковий момент часу $t = 0$ температура розплаву в ПЄ і навколишньому середовищі дорівнює T_0 і $T_{НС}$ відповідно. На поверхні A відбувається нагрів скануючим електронним променем з питомою потужністю q в деякій заданій області D ($D \in A$). З поверхні A відбувається радіаційне випромінювання в навколишнє середовище. Ступінь чорноти розплаву титану ε . На бокових гранях B і на дні C відбувається конвективний теплообмін зі стінками ПЄ з питомими потужностями охолодження q_{cm} та q_d відповідно. На грані E температура приймається рівній температурі розплавленого металу в початковий момент часу T_0 і теплообмін з зовнішнім середовищем не відбувається. На грані F теплообмін також відсутній. Необхідно визначити температуру T в кожній точці ПЄ $(x, y, z) \in V$ в кожен момент часу $0 < t < t_m$ (t_m – час моделювання).

Опис теплових процесів в ПЄ виконується на основі рівняння теплопровідності Фур'є, яке враховує вплив течії розплаву. Його можна записати в наступному вигляді [27, 116]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u(t) \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), (x, y, z) \in V, 0 < t < t_m \quad (2. 1)$$

де v, w - компоненти вектора швидкості середовища точки x, y, z , а швидкість $u(t)$ змінюється в часі випадковим чином в діапазоні $\{u_{min} \dots u_{max}\}$

$$u(t) = \{u_{min} \dots u_{max}\}, \quad (2. 2)$$

Початкові умови для задачі теплообміну:

$$T|_{(x,y,z) \in V; t=0} = T_0. \quad (2. 3)$$

Граничні умови задачі теплообміну на гранях області V :

- на поверхні обігріву розплаву електронним променем (поверхня D):

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{(x,y,z) \in D} = q - \varepsilon \sigma_B (T^4|_{(x,y,z) \in D} - T_{НС}^4), \quad (2. 4)$$

де $\sigma_B = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт·м⁻²·К⁻⁴ – постійна Стефана-Больцмана;

- на поверхні розплаву A/D :

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{(x,y,z) \in D} = -\varepsilon \sigma_B (T^4|_{(x,y,z) \in D} - T_{HC}^4). \quad (2.5)$$

Потужність теплового потоку променю в області D розподіляється згідно виразу $q = q_0 \exp(-k_{\text{ЕПГ}} r_{\text{ЕПГ}}^2)$ [25], а в часі за заданим законом, $q = q(t, x, y)$, де q_0 – питома потужність теплового потоку в центрі області D , $k_{\text{ЕПГ}}$ – коефіцієнт зосередженості електронного променю; $r_{\text{ЕПГ}} \in [0, r_0]$ – відстань від центру області D до точки на поверхні, яка розглядається.

- на бокових гранях B :

$$\pm \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{(x,y,z) \in B} = q_{cm}; \quad (2.6)$$

- на дні C :

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{(x,y,z) \in C} = q_d; \quad (2.7)$$

- на грані E :

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{(x,y,z) \in E} = 0; \\ T|_{(x,y,z) \in E} = T_0 \end{cases}; \quad (2.8)$$

- на грані F :

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{(x,y,z) \in F} = 0. \quad (2.9)$$

Розглянемо стаціонарну течію розплаву в ПЄ (рис. 2.6). Рідина поступає в ПЄ через грань E швидкістю u , а витікає через грань F . Динамічна в'язкість розплаву μ , Па·с.

Течія розплаву в ПЄ описується системою диференційних рівнянь Нав'є-Стокса для стаціонарного випадку з урахуванням гравітації і рівнянням нерозривності середовища [27]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \Delta u \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \Delta v \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = g\rho - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \Delta w \right) \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \end{array} \right. \quad (2.10)$$

де p - тиск в точці x, y, z ; Δ - оператор Лапласа.

До системи рівнянь 2. 10 додано граничні умови:

- на поверхні A , враховуючи, що в плавильній установці вакуум, тиском можна знехтувати, а течія вздовж осі Z відсутня:

$$p|_A = 0, \quad w|_A = 0; \quad (2.11)$$

- на гранях B, C, D течія розплаву відсутня:

$$\begin{cases} u|_B = 0, v|_B = 0, w|_B = 0; \\ u|_C = 0, v|_C = 0, w|_C = 0; \\ u|_D = 0, v|_D = 0, w|_D = 0; \end{cases} \quad (2.12)$$

- через грань E рідина тече з постійною швидкістю u вздовж осі x :

$$u|_E = u, v|_E = 0, w|_E = 0; \quad (2.13)$$

- на грані F приймаємо тиск нульовим і течія здійснюється тільки вздовж осі x :

$$p|_F = 0, v|_F = 0, w|_F = 0. \quad (2.14)$$

Спростивши рівняння (2. 1) та систему рівнянь (2.10) з урахуванням граничних умов гідродинамічної задачі (2.11...2.14) отримуємо рівняння:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), (x, y, z) \in V, 0 < t < t_m \quad (2.15)$$

Враховуючи вираз (2.2), початкову умову 2.3 та граничні умови 2.4... 2.9 рівняння 2.15 утворюють математичну модель обігріву титанового розплаву в ПЄ ЕПУ з урахуванням гідродинаміки його течії.

2.3. Тестова перевірка моделі процесу в проміжній ємності

2.3.1. Моделювання процесу в проміжній ємності з використанням програмного пакету ANSYS

На сьогодні при дослідженні термо- та гідродинамічних процесів розплавів металів використовуються САЕ-програми на базі методів скінченних елементів чи різниць [113]. Однією з таких САЕ-програм є програмний пакет ANSYS Fluent, який знайшов широке використання при моделюванні теплових та гідродинамічних процесів, а адекватність отриманих результатів неодноразово підтверджена експериментально [52, 125].

На основі складеної математичної моделі було проведено моделювання розподілу температур в ПЄ ЕПУ ТІСО-15М з урахуванням течії розплаву за допомогою програмного пакету скінчено-елементного аналізу ANSYS Fluent.

Параметри моделі відповідають реальним умовам нагріву розплаву в ЕПУ ТІСО-15М [54]. При моделюванні були прийняті наступні постійні величини: $\lambda = 20$ Вт/(м·К); c_p Дж/(кг·К); $\rho = 4120$ кг/м³[109]; $T_0 = 2000$ К; $q_{ст} = 0.235$ МВт/м², $q_d = 0.18$ МВт/м² [109]; $Q_{ЕПГ} = 150$ кВт; $\varepsilon = 0.3$ [51]; $u = 0.003$ м/с; розміри ПЄ $l \times b \times h = 150 \times 400 \times 30$ мм. Отримані температурні поля представлені на рис. 2.7 [102].

По отриманим розподілам температур на дні ПЄ (рис. 2.7 а), на глибині 15 мм (рис. 2.7б) та на поверхні (рис. 2.7 в) можна зробити висновок про значну нерівномірність прогріву рідкого металу по всьому об'єму. Також течія розплаву приводить до витягування температурного поля в напрямку носка ПЄ. На периферії температура розплаву значно нижча за температури в центральній області. Отриманий результат пояснює утворення гарнісажу на стінках та дні ПЄ.

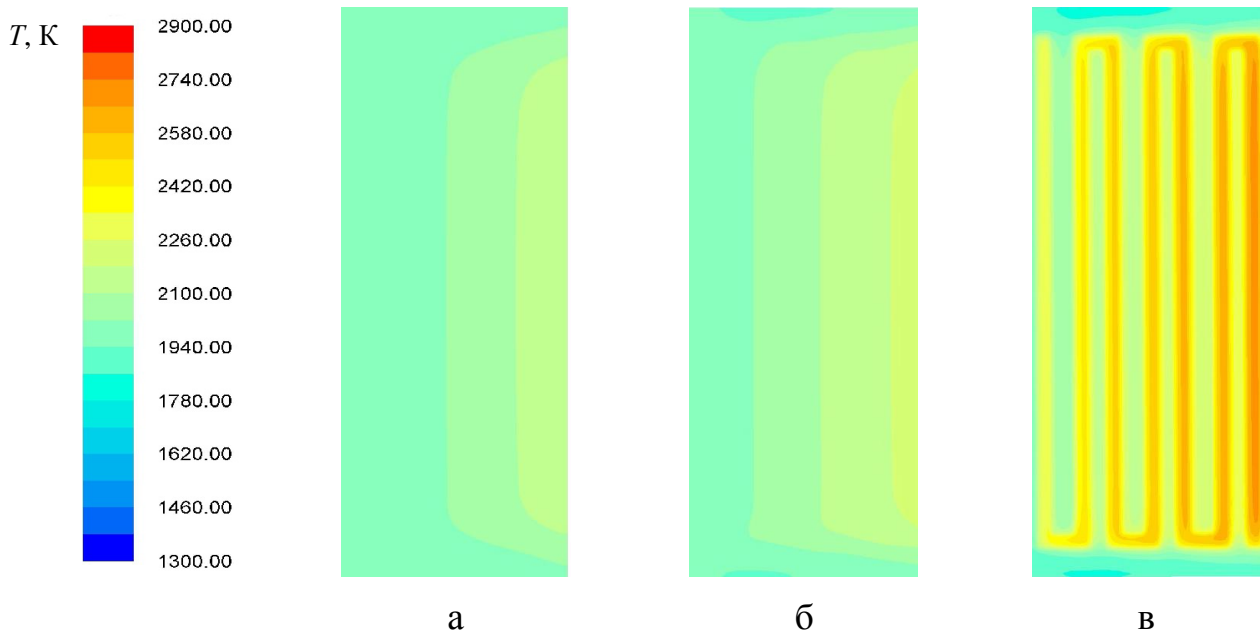


Рис. 2.7. Температурні поля в ПЄ по висоті: а – $z=5$ мм; б – $z=15$ мм; в – $z=30$ мм

2.3.2. Моделювання процесу в проміжній ємності з використанням методу дробових кроків в програмному пакеті MATLAB

Незважаючи на свої переваги багатозадачності та ергономічності при моделюванні процесу тепло-масообміну в ПЄ при ЕПП титану в ANSYS Fluent неможливо оперативно змінювати граничні умови в процесі моделювання, тобто неможливо відтворити роботу механотронної системи керування траєкторією руху електронного променя в ПЄ.

Тому для чисельного вирішення математичної моделі обігріву титанового розплаву в ПЄ ЕПУ з урахуванням гідродинаміки його течії було використано програмний пакет MATLAB та метод скінчених різниць, а саме схему розщеплення за напрямками, або локально-одновимірну схему (метод дробових кроків [112]), яка полягає у вирішенні на кожному часовому кроці замість однієї тривимірної задачі трьох одновимірних задач. З метою додаткового спрощення та пришвидшення чисельного вирішення задачі був використаний метод прогонки [80].

Вибір такої схеми зумовлений її стійкістю, швидкістю вирішення та можливістю суттєво зменшити обчислювальну складність задачі. Рівняння та схема розрахунку (рис. 2.8) приведені нижче [38].

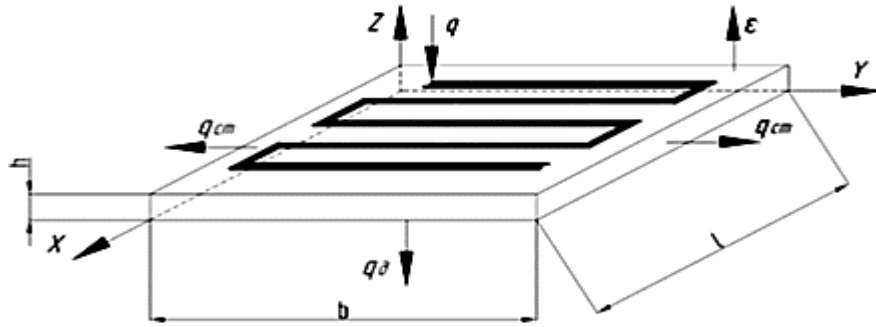


Рис. 2.8: Схема розрахунку тепло-масообміну в ПЄ методом дробових кроків

Згідно рис. 2.8:

$$\begin{cases} 0 < x < l; \\ 0 < y < b; \\ 0 < z < h. \end{cases} \quad (2.16)$$

Граничні умови:

Вісь x :

При $x = 0$:

$$T|_{\substack{x=0 \\ 0 < y < b \\ 0 < z < h}} = T_0 \quad (2.17)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\substack{x=0 \\ 0 < y < b \\ 0 < z < h}} = 0. \quad (2.18)$$

Розкривши і спростивши вираз (2. 18) отримуємо:

$$\frac{\lambda}{\Delta x} (T_{2,j,k,s+1/3} - T_{1,j,k,s+1/3}) = 0, \quad (2.19)$$

де i, j, k – одиничні вектори по осям x, y, z ; s – номер часового кроку.

При $0 < x < l$:

$$\frac{T_{i,j,k,s+1/3} - T_{i,j,k,s}}{\Delta t} = a \frac{T_{i-1,j,k,s+1/3} - 2T_{i,j,k,s+1/3} + T_{i+1,j,k,s+1/3}}{\Delta x^2}, \quad (2.20)$$

де $a = \lambda/c_p$ – коефіцієнт температуропровідності.

Спростуючи вираз 2. 20 отримуємо:

$$a\Delta t T_{i-1,j,k,s+1/3} - (\Delta x^2 + 2a\Delta t)T_{i,j,k,s+1/3} + a\Delta t T_{i+1,j,k,s+1/3} = -\Delta x^2 T_{i,j,k,s} \quad (2. 21)$$

При $x = l$:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{\substack{x=l \\ 0 < y < b \\ 0 < z < h}} = 0. \quad (2. 22)$$

Спростуючи вираз 2.22 отримуємо:

$$-\lambda T_{i,j_{max},k,s+1/3} + \lambda T_{i,j_{max}-1,k,s+1/3} = 0; \quad (2. 23)$$

Аналогічно отримуємо вирази для осей y та z :

Вісь y :

- при $y = 0$:

$$\lambda(T_{i,2,k,s+2/3} - T_{i,1,k,s+2/3}) = q_{ст}\Delta y; \quad (2. 24)$$

- при $0 < y < b$:

$$a\Delta t T_{i,j-1,k,s+2/3} - (\Delta y^2 + 2a\Delta t)T_{i,j,k,s+2/3} + a\Delta t T_{i,j+1,k,s+2/3} = -\Delta y^2 T_{i,j,k,s+1/3}; \quad (2. 25)$$

- при $y = b$:

$$\lambda(T_{i,j_{max},k,s+2/3} - T_{i,j_{max}-1,k,s+2/3}) = -q_{ст}. \quad (2. 26)$$

Вісь z :

- при $z = 0$:

$$\lambda(T_{i,j,2,s+1} - T_{i,j,1,s+1}) = q_d\Delta z; \quad (2. 27)$$

- при $0 < z < h$;

$$a\Delta t T_{i,j,k-1,s+1} - (\Delta z^2 + 2a\Delta t)T_{i,j,k,s+1} + a\Delta t T_{i,j,k+1,s+1} = -\Delta z^2 T_{i,j,k,s+2/3}; \quad (2. 28)$$

- при $z = h$:

- в зоні дії променю:

$$\lambda T_{i,j,k_{max}-1,s+1} - \lambda T_{i,j,k_{max},s+1} = -\Delta z(q + \sigma_B T_0^4) + \sigma_B T_{i,j,1,s}^4; \quad (2. 29)$$

- в зоні без променю:

$$\lambda T_{i,j,k_{max}-1,s+1} - \lambda T_{i,j,k_{max},s+1} = \sigma_B T_{i,j,1,s}^4 - \Delta z \sigma_B T_0^4. \quad (2. 30)$$

Використовуючи вирази 2.19, 2.21, 2.23...2.30 та метод прогонки в програмному пакеті MATLAB [122, 129] була складена програма розрахунку

тепло-масообміну в ПЄ з можливістю зміни параметрів потужності обігріву та їх координат та швидкості в процесі моделювання. (див. Додаток А)

2.3.3. Порівняння отриманих результатів тестових задач за допомогою ANSYS та MATLAB

Для перевірки адекватності запропонованої програми у програмному пакеті ANSYS Fluent був змодельований процес теплообміну в досліджуваній області з урахуванням течії розплаву при різних швидкостях течії та різних коефіцієнтах тепловіддачі. Проаналізовано характер розподілу температур та їх значення на поверхні розплаву, а також висоті 15 мм та 5 мм. Час моделювання складав $t_m = 200$ с, оскільки його достатньо для установаження стаціонарного режиму процесу (див. Додаток Б). Результати моделювання представлені в табл. 2.1 та на рис. 2.9.

Таблиця 2.1

Порівняння результатів моделювання

№	u , м/с	$Q_{\text{ЕПГ}}$, кВт	$q_{\text{ст}}$, МВт/м ²	$q_{\text{д}}$, МВт/м ²	z , мм	T_{max} , К		δ_{max} , %
						Ansys Fluent	MATLAB	
1.	0.001	150	0.235	0.15	30	2918	2901	0.5
					15	2430	2406	1.0
					5	2300	2304	1.1
2.	0.003	150	0.235	0.15	30	2640	2624	0.6
					15	2160	2158	0.09
					5	2030	2017	0.6
3.	0.006	150	0.235	0.15	30	2523	2527	0.15
					15	2040	2061	1.02
					5	1950	1950	0

Продовж. табл. 2.1

4.	0.003	50	0.235	0.15	30	2100	2116	0.7
					15	1960	1958	0.1
					5	1950	1950	0
5.	0.003	100	0.235	0.15	30	2365	2353	0.5
					15	2050	2043	0.3
					5	1950	1950	0
6.	0.003	150	0.235	0.15	30	2640	2624	0.6
					15	2160	2158	0.09
					5	2030	2017	0.6
7.	0.003	200	0.235	0.15	30	2909	2890	0.65
					15	2240	2269	1.3
					5	2090	2095	0.2
8.	0.003	150	0	0	30	2692	2678	0.52
					15	2220	2239	0.85
					5	2155	2152	0.14
9.	0.003	150	0.185	0.06	30	2672	2656	0.59
					15	2185	2206	0.96
					5	2100	2098	0.095
10.	0.003	150	0.235	0.18	30	2640	2624	0.6
					15	2160	2158	0.09
					5	2030	2017	0.6
11.	0.003	150	0.5	0.38	30	2562	2546	0.62
					15	2020	2035	0.74
					5	1950	1950	0

Температурні поля отримані за допомогою розробленої програми мають подібну форму до температурних полів отриманих за допомогою програмного

пакету ANSYS Fluent; відносна похибка результатів моделювання не перевищує 2% по максимальній температурі (табл. 2.1 та рис. 2.9) [133].

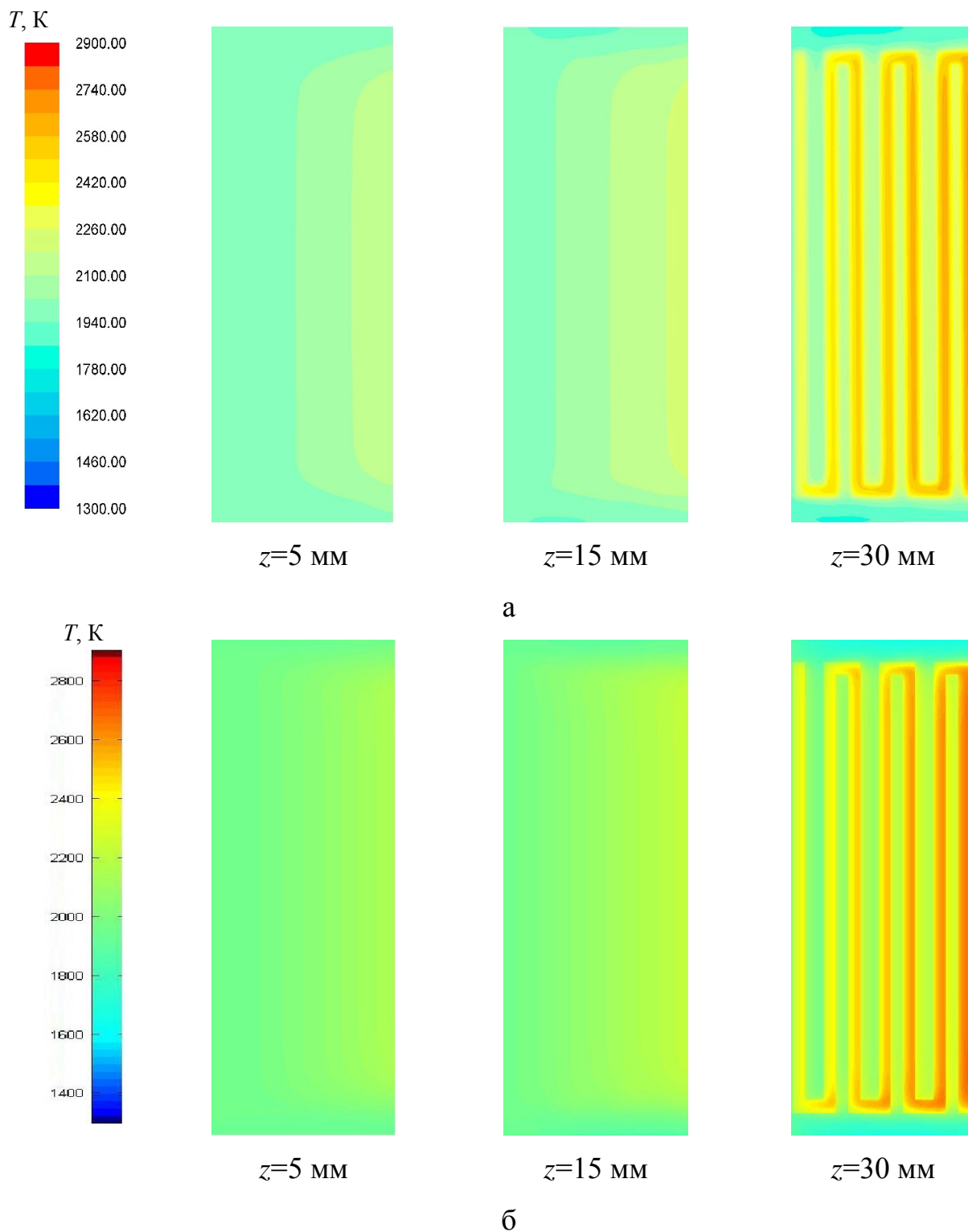


Рис. 2.9. Температурні поля в ПС при $u = 0.003$ м/с, $Q_{\text{ЕПГ}} = 150$ кВт, $q_{\text{СТ}} = 0.235$ МВт/м² $q_{\text{Д}} = 0.15$ МВт/м², отримані за допомогою: а – Ansys Fluent; б – MATLAB

2.4. Дослідження впливу швидкості течії розплаву, потужності обігріву та розподілу потужності обігріву по поверхні ПЄ на теплообмін

Проведене дослідження математичної моделі тепло-масообміну в ПЄ з використанням програмного пакету MATLAB. В якості вхідних змінних параметрів були використані швидкість течії розплаву u , м/с, потужність обігріву ЕПГ $Q_{\text{ЕПГ}}$, кВт (відповідає добутку питомої потужності ЕПГ на площу обігріву променем $Q_{\text{ЕПГ}} = q \cdot S_{\text{об}}$) та коефіцієнт розподілу потужності по поверхні ПЄ n (досліджувана область ПЄ була умовно поділена на дві рівні частини перпендикулярно лінії течії; на ліву частину подається n % всієї потужності ЕПГ, а на праву $100\% - n$ % відповідно).

Вхідні параметри під час чисельного моделювання змінювалися наступним чином:

- швидкість течії розплаву $u=0.001 \dots 0.006$ м/с, з кроком 0.001 м/с;
- потужність обігріву $Q_{\text{ЕПГ}} = 50 \dots 350$ кВт, з кроком 50 кВт;
- коефіцієнт розподілу потужності по поверхні ПЄ $n = 30\%, 43\%, 50\%, 57\%, 70\%$ (рис. 2.10).

Провівши обробку отриманих результатів в якості вихідних параметрів обрані середня температура титанового розплаву $T_{\text{сер}}$ в ПЄ та відносний розплавлений об'єм титану $v_{\text{розп}}$ (відношення розплавленого об'єму титану (враховуються тільки вузли в масиві температур із значенням $T_{\text{пл}} \leq T \leq T_{\text{кип}}$) до загального об'єму ПЄ $v_{\text{розп}} = (V_{\text{розп}}/V) \cdot 100\%$).

Залежності вихідних параметрів від потужності обігріву ЕПГ $Q_{\text{ЕПГ}}$ при різних швидкостях течії u для різних розподілів потужності обігріву по поверхні ПЄ n представлено на рис. 2.11 та 2.12.

Проаналізувавши графіки отриманих залежностей та температурні поля (рис. 2.11...2.16) можна зробити наступні висновки: зі збільшенням швидкості течії середня температура розплаву та значення відношення розплавленого об'єму титану до загального об'єму ПЄ знижується, але температура

розподіляється більш рівномірно. Так при відсутності течії чи при незначній її швидкості (рис. 2.13а, б відповідно) в центральній зоні метал буде досягати недопустимих значень температури [102]. При швидкості течії розплаву $u = 0.003$ м/с (рис. 2.13в), розплав прогрівається в необхідному температурному діапазоні. При підвищенні швидкості течії (рис. 2.13г) розплав не встигає прогрітись до необхідних температур рафінування, а поблизу водоохолоджуваних мідних стінок може почати кристалізуватися в результаті теплообміну з ними.

Отримані результати підтверджується практикою експлуатації ЕПУ ТІСО-15М. Тому для технологічного процесу виплавки титанових зливків на промисловій ЕПУ ТІСО-15М рекомендовано такі режими подачі шихтового матеріалу в зону плавки, щоб вагова витрата розплаву відповідала швидкості $u = 0.003 \dots 0.005$ м/с.

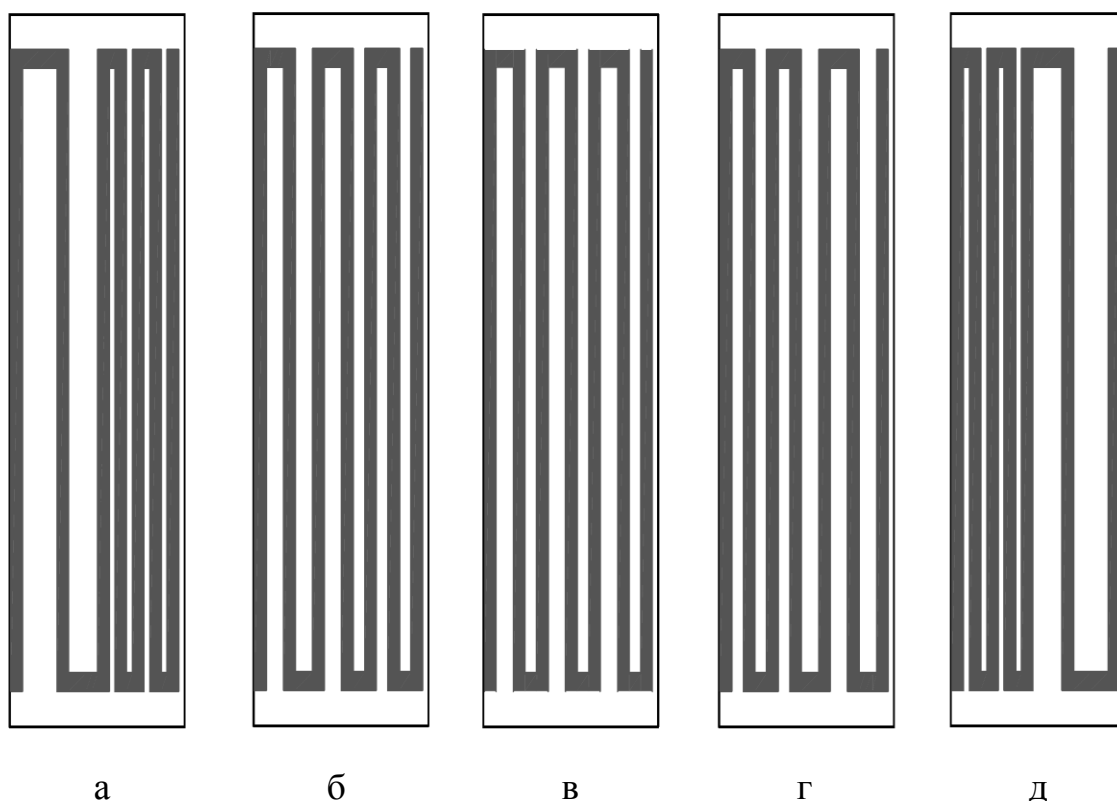
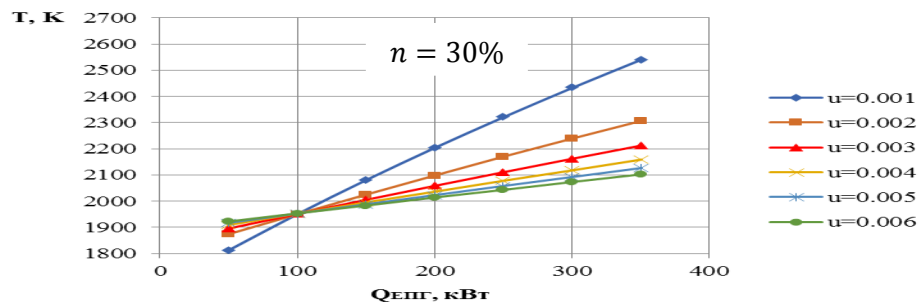
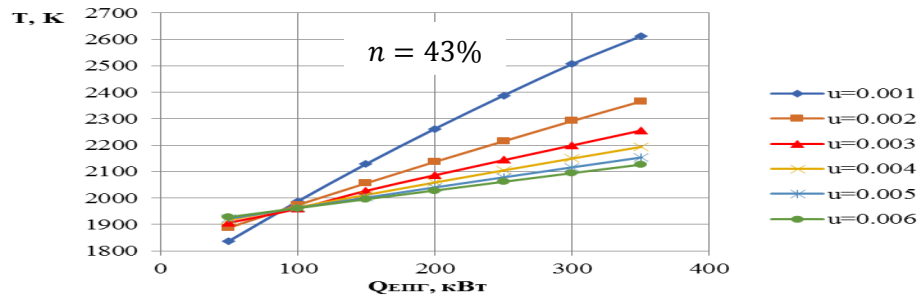


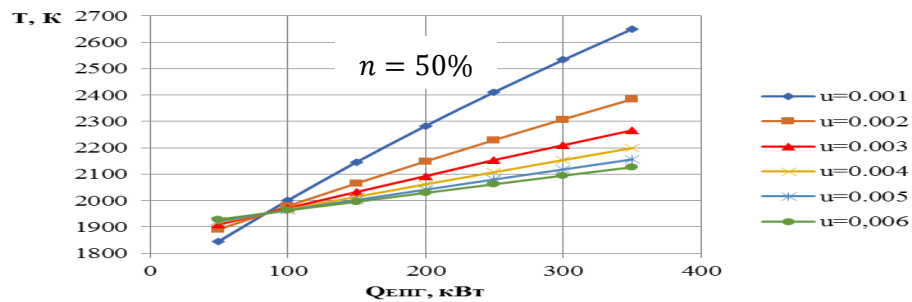
Рис. 2.10. Траєкторії руху електронного променя для коефіцієнтів розподілу потужності по поверхні ПЄ: а – $n = 30\%$; б – $n = 43\%$; в – $n = 50\%$; г – $n = 57\%$; д – $n = 70\%$



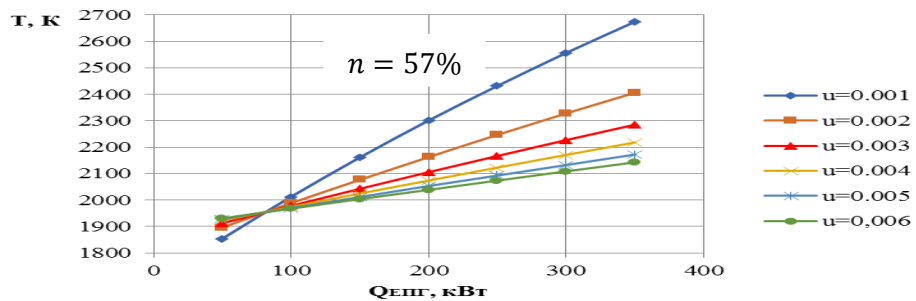
а



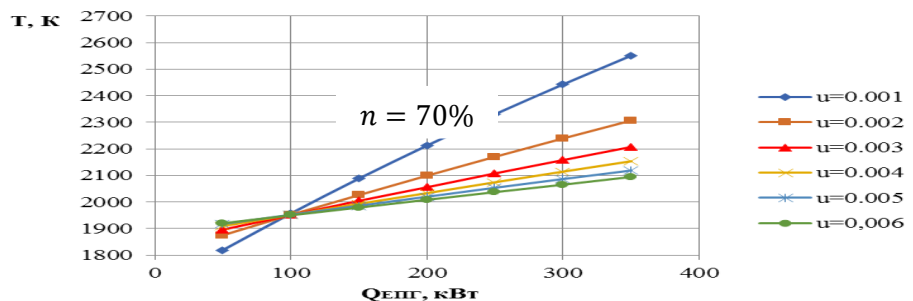
б



в

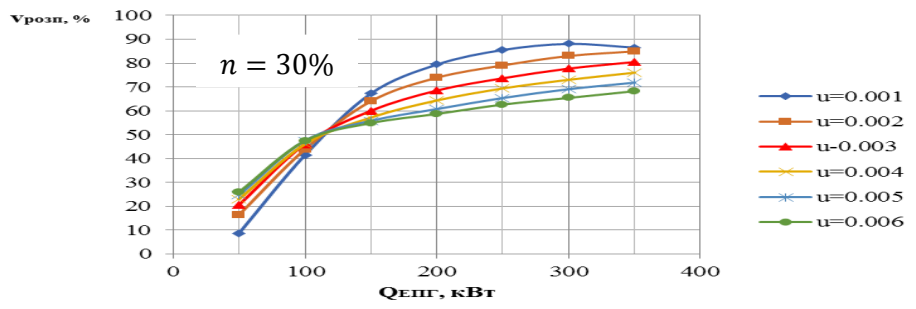


г

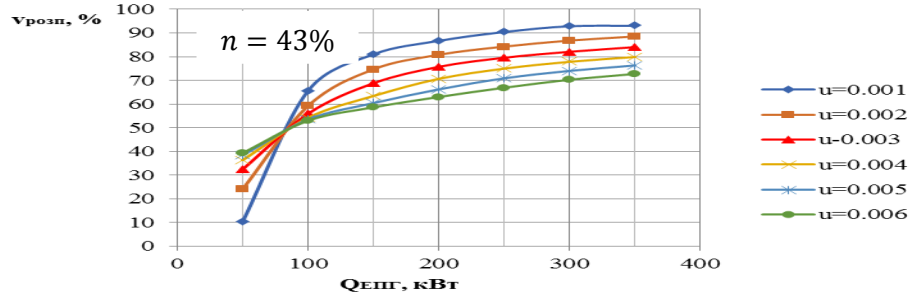


д

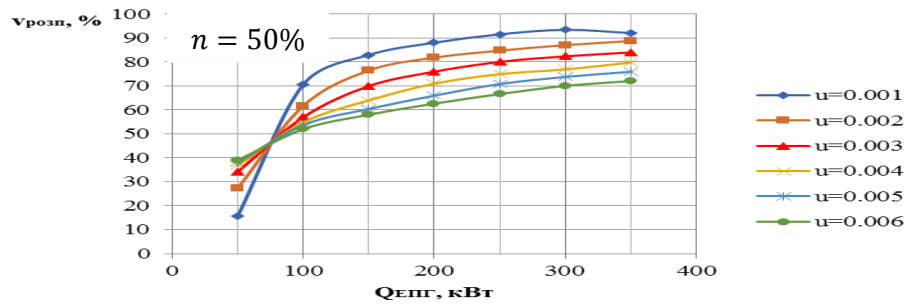
Рис. 2.11. Залежність середньої температури розплаву в ПС від вхідних параметрів



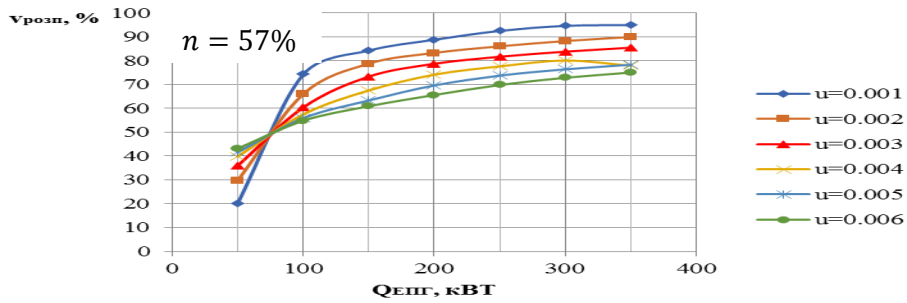
а



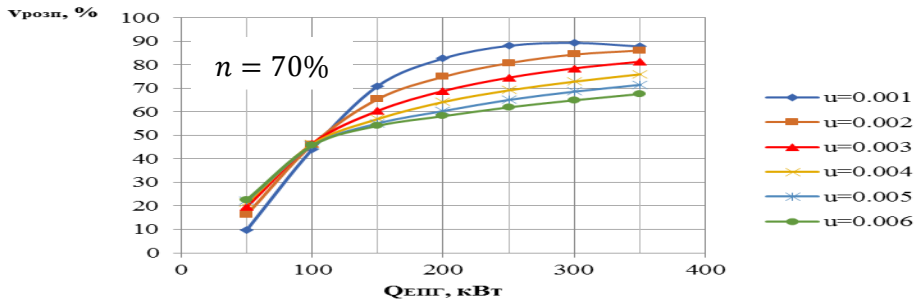
б



в



г



д

Рис. 2.12. Залежність відносного розплавленого об'єму титану від вхідних параметрів

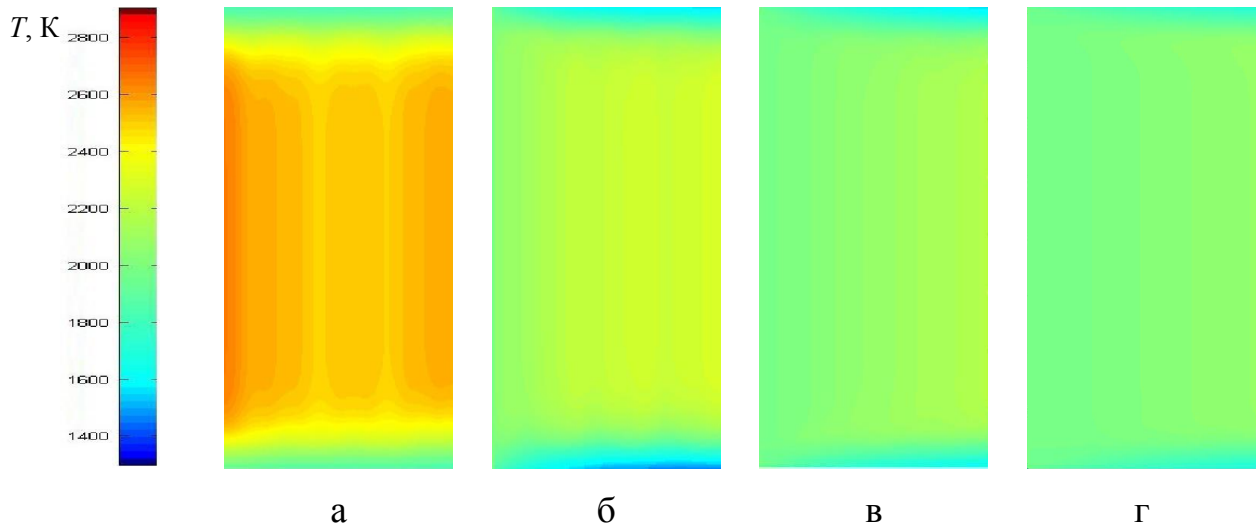


Рис. 2.13. Температурні поля в ПЄ на глибині $z=15$ мм при $Q_{ЕПГ} = 150$ кВт, $n = 50\%$: а – $u=0$ м/с; б – $u=0.001$ м/с; в – $u=0.003$ м/с; г – $u=0.006$ м/с

Розподіл температури розплаву на поверхні досліджуваної області отриманий, при різних значеннях $Q_{ЕПГ}$, представлений на рис 2.14. З отриманого розподілу видно, що збільшення питомої потужності електронного променя збільшує температуру в центральній частині досліджуваної області, а зміна температури розплаву в периферійній частині та області контакту титанового розплаву з охолоджуваними стінками не суттєва.

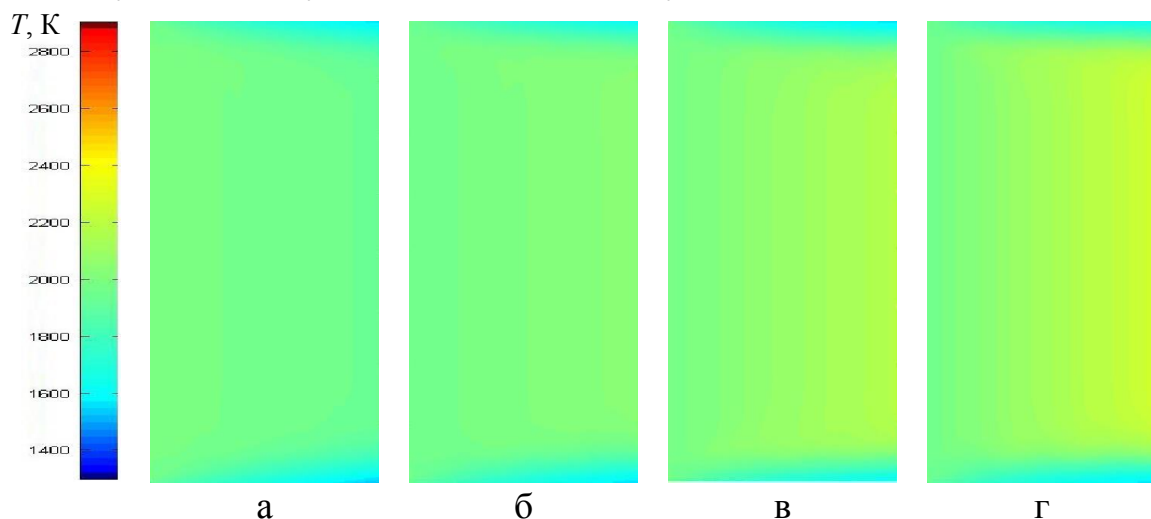


Рис. 2.14. Температурні поля в ПЄ на висоті $z=15$ мм при $n = 50\%$ та $u=0.003$ м/с: а – $Q_{ЕПГ} = 50$ кВт; б – $Q_{ЕПГ} = 100$ кВт; в – $Q_{ЕПГ} = 150$ кВт; г – $Q_{ЕПГ} = 200$ кВт

При обігріві розплаву ПЄ також важливо коректно розподіляти потужність обігріву розплаву металу по її поверхні за допомогою траєкторії променя ЕПГ, оскільки в початковій частині ПЄ розплав прогрітий менше у порівнянні із зоною близькою до зливного носка.

Аналіз отриманих температурних полів (рис. 2.15...2.16) показує, що при недостатньому обігріві лівої області ($n < 50\%$) розплав на висоті 15 мм прогрівається недостатньо. Його температура близька до температури фазового переходу, що є небажаним (рис. 2.15а, б, 2.16а, б). Також при $n = 30\%$ на поверхні перегрівається права область (рис. 2.15а). При рівномірному розподілі потужності обігріву (рис. 2.15в, 2.16в) розплав прогрівається до необхідних температур, однак на поверхні розплаву в правій області можливий перегрів і на висоті 15 мм розподіл температури не рівномірний. При помірному перегріві лівої області (рис. 2.15г, 2.16г) розплав прогрівається рівномірно на глибині і на поверхні в необхідному температурному діапазоні. При суттєвому перегріві лівої області на поверхні розплав перегрівається, а розподіл температури на глибині нерівномірний (рис. 2.15д, 2.16д).

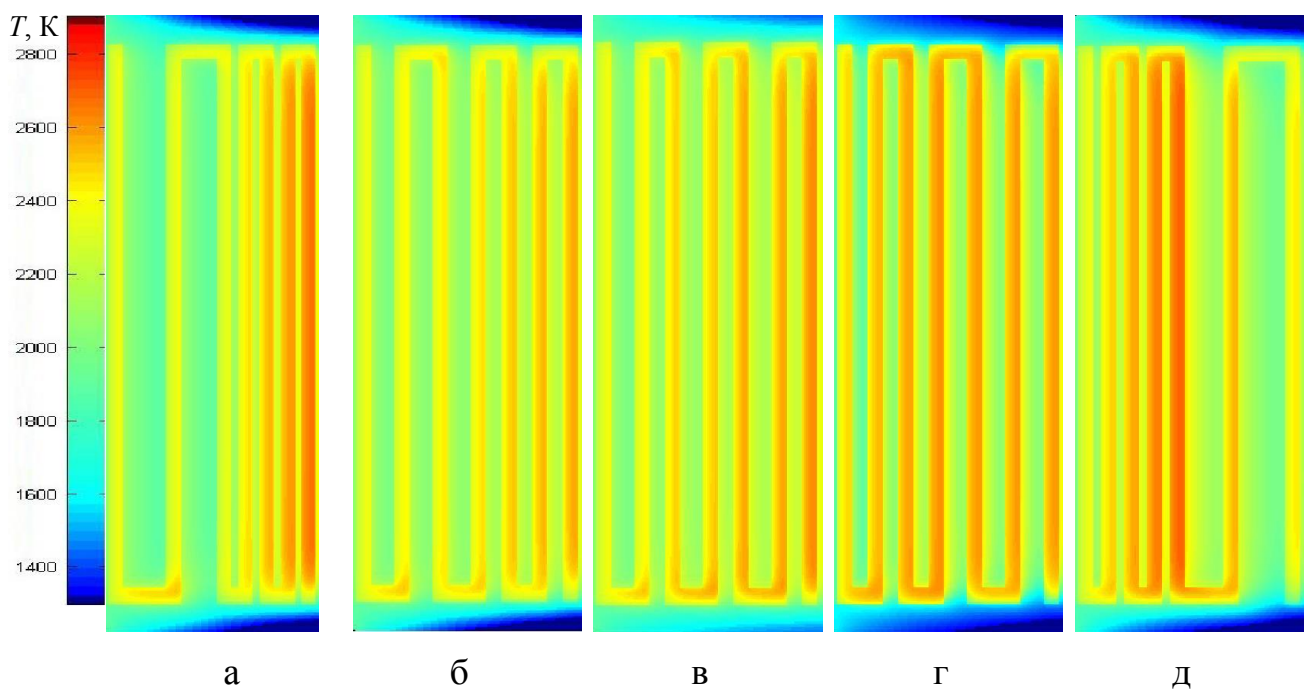


Рис. 2.15. Розподіл температури на поверхні розплаву: а – $n = 30\%$;
б – $n = 43\%$; в – $n = 50\%$; г – $n = 57\%$; д – $n = 70\%$

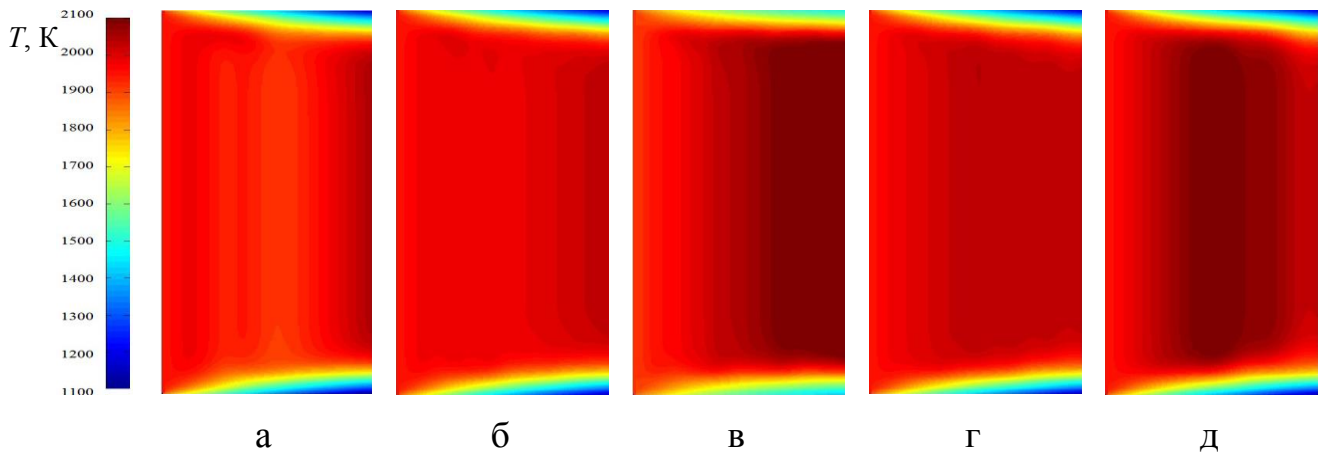


Рис. 2. 16. Розподіл температури на висоті $z=15$ мм: а – $n = 30\%$; б – $n = 43\%$; в – $n = 50\%$; г – $n = 57\%$; д – $n = 70\%$

Таким чином, існує діапазон оптимальних співвідношень розподілу потужності ЕПГ по поверхні розплаву, при якому відбувається рівномірний прогрів по всьому об'єму. На основі проведеного моделювання, приймається, що даний діапазон знаходиться в межах $n = 50 \dots 60\%$ [39].

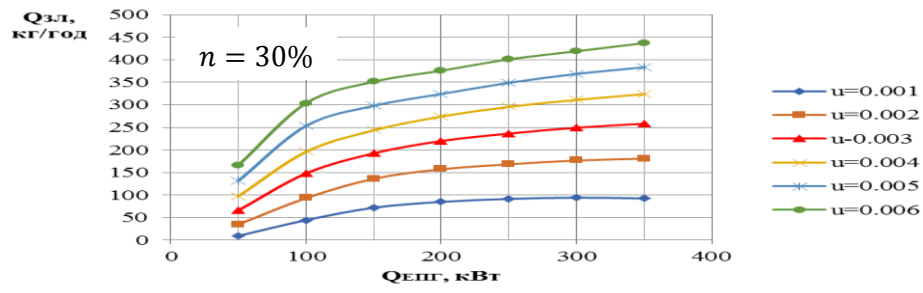
В роботі [109] рекомендованим діапазоном температур для виплавки титану та сплаву Ti-6Al-4V є 1950...2200 К. А чим більше значення відношення розплавленого об'єму титану до загального об'єму ПЄ, тим краще оплавляється шихта і тим більше рідкої фази в ПЄ. Тобто необхідно щоб $v_{розп} \rightarrow 100\%$. Прийнято, що для більш повного дослідження процесу необхідно щоб $v_{розп} > 80\%$.

Враховуючи вищесказане, були відібрані комбінації вхідних змінних параметрів, які відповідають необхідним значенням $T_{сер}$ та $v_{розп}$. З використанням методу найменших квадратів [58] була проведена апроксимація цих комбінацій та отриманні аналітичні залежності та $T_{сер} = f(u, Q_{ЕПГ}, n)$ та $v_{розп} = f(u, Q_{ЕПГ}, n)$ (2.31, 2.32). Використання отриманих залежностей дозволяє в подальшому розробити алгоритм керування траєкторією руху електронного променя та механізмом подачі шихти в зону плавки.

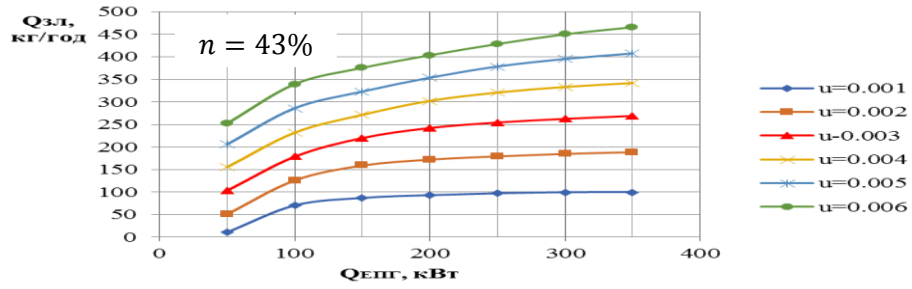
$$T_{сер} = 1.67\text{К} - 398 \frac{\text{с} \cdot \text{К}}{\text{мм}} \cdot u + 22.4 \frac{\text{К}}{\%} \cdot n + 8350 \frac{\text{К}}{\text{кВт}} \cdot Q_{ЕПГ}; \quad (2.31)$$

$$v_{розп} = 0.066\% - 15.2\% \frac{\text{с}}{\text{мм}} \cdot u + 0.93\% \cdot n + 0.297\% \text{кВт}^{-1} \cdot Q_{ЕПГ}. \quad (2.32)$$

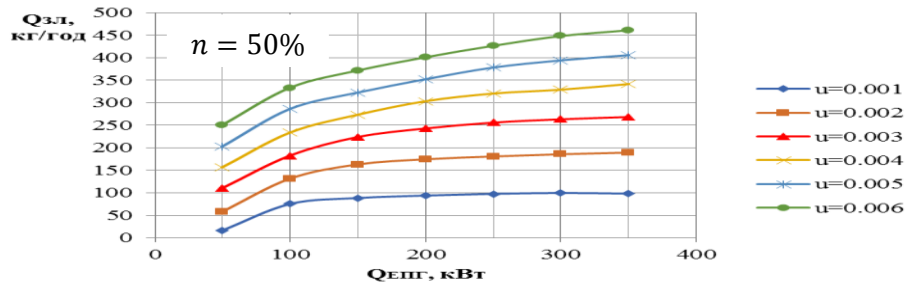
Знаючи геометрію ПЄ, швидкість течії розплаву та значення відношення розплавленого об'єму титану до загального об'єму ПЄ можна також отримати графічні залежності витрати розплаву з ПЄ в кристалізатор (рис. 2.17).



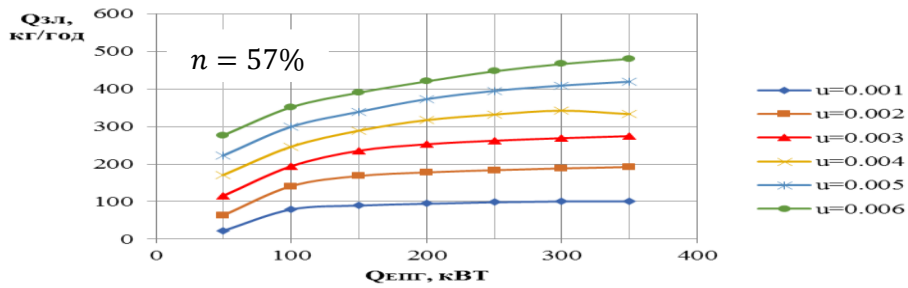
а



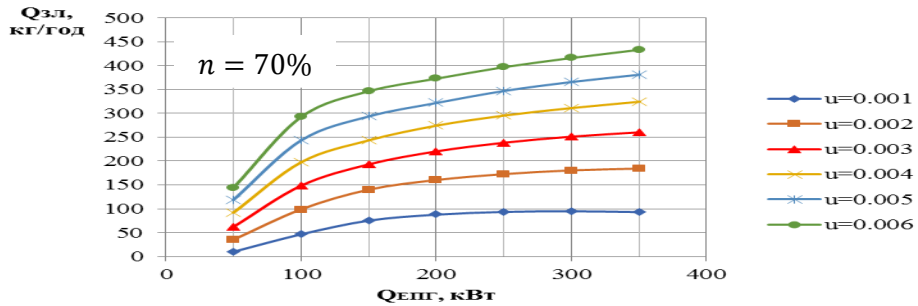
б



в



г



д

Рис. 2.17. Залежність витрати титанового розплаву з ПС в кристалізатор від вхідних параметрів

Порівняння отриманих витрат титанового розплаву (рис. 2.17), з рекомендованими для забезпечення необхідного хімічного складу зливку дозволяє також розрахувати швидкість руху приводу витягування зливку з кристалізатора, що є важливим при подальшій розробці системи керування приводом витягування зливку з кристалізатора.

2.5. Висновки

1. Розроблено математичну модель процесу в ПЄ ЕПУ ТІСО-15М з урахуванням течії розплаву, яка дозволяє визначити розподіл температур в ПЄ. За допомогою програмного пакету скінчено-елементного аналізу ANSYS Fluent та методу скінчених різниць з використанням методу дробових кроків в програмному пакеті MATLAB проведено моделювання тепло-масообміну в ПЄ.

2. Проведено моделювання нестационарного обігріву титанового розплаву в досліджуваній області при різних швидкостях течії, потужностях обігріву ЕПГ, а також при різному розподілу потужності обігріву по поверхні досліджуваної області.

3. За результатами моделювання встановлено:

1) збільшення швидкості течії титанового розплаву призводить до зниження температури в центральній частині досліджуваної області і незначного підвищення температури розплаву в області його контакту зі стінками та дном досліджуваної області, а розподіл температур більш рівномірний. Течія розплаву призводить до витягування температурного поля в напрямку носка ємності. Для подальшого моделювання вибрано діапазон швидкостей $u=0.003\dots 0.005$ м/с, оскільки при такій швидкості течії розплав встигає прогрітися до необхідних температур у всьому об'ємі в ЕПУ ТІСО-15М.

2) Збільшення потужності обігріву ЕПГ при швидкостях течії менше 0.003 м/с призводить до підвищення температури центральній області до недопустимих значень, тому при значеннях потужності ЕПГ більше 200 кВт необхідно забезпечувати подачу шихти відповідну швидкості течії розплаву в

діапазоні $u=0.003\dots 0.005$ м/с. При цьому температура розплаву в периферійній області ПЄ практично не змінюється.

3) Для рівномірного прогріву розплаву по всьому об'єму ПЄ до температур вищих за температуру плавлення бажано обігрівати її поверхню в області початку течії на 15...20% більше за область подальшої течії.

4. Отримані залежності середньої температури розплаву в ПЄ, відношення розплавленого об'єму титану до загального об'єму ПЄ та витрати розплаву з ПЄ в кристалізатор від швидкості течії розплаву, потужності обігріву ЕПГ та розподілу потужності обігріву по поверхні ПЄ будуть використані при: прогнозуванні температурного стану в ПЄ на основі вхідних параметрів; при розробці алгоритмів керування траєкторією руху електронного променя ЕПГ з урахуванням отриманого теплового розподілу в досліджуваному об'ємі; визначенні швидкості приводу витягування зливку з кристалізатора під час розробки контуру витягування зливку з кристалізатора.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень даного розділу наведено в таких публікаціях:

1. Цибрій Ю.О. Моделювання розподілу температур титанового розплаву з урахуванням його течії / Ю.О. Цибрій, Г.Г. Грабовський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2014. – №3 (72) – С.65 – 71.

2. Tsibriy Iuriy Heat exchange calculation in the intermediate container under electron-beam melting / Iuriy Tsibriy, Heorhiy Grabovskiy // Metallurgical and Mining Industry – 2015. – №5 – pp. 51 – 60.

3. Грабовський Г.Г. Моделювання процесу обігріву розплаву титану з урахуванням його течії. Постановка задачі / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали ХІХ міжнародної науково-технічної конференції. – Кіровоград, 2014. – С.110 – 111.

4. Грабовський Г.Г. Моделювання процесу обігріву розплаву титану з урахуванням його течії. Аналіз результатів моделювання. / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали ХХ міжнародної науково-технічної конференції. – К., 2015. – С.43 – 45.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ РУХОМ ЕЛЕКТРОННОГО ПРОМЕНЯ ЗІ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ ПО ТЕМПЕРАТУРІ НА ТЕПЛО-МАСООБМІН В ПРОМІЖНІЙ ЄМНОСТІ

Розроблено алгоритми керування траєкторією руху електронного променя в ПЄ з урахуванням роботи однієї та декількох ЕПГ і проведено порівняльний аналіз роботи розробленого алгоритму керування траєкторією руху електронного променя зі зворотним зв'язком по середній температурі та стандартного алгоритму з зигзагоподібною траєкторією.

3.1. Алгоритм керування траєкторією руху електронного променя зі зворотним зв'язком по температурі

Складність ЕПУ, тривалість технологічного процесу переплавки і значна кількість контрольованих параметрів зумовлюють створення алгоритму та контуру керування траєкторією руху електронного променя в ПЄ, які забезпечать програмне керування траєкторією електронного променя за допомогою магнітної відхиляючої системи в процесі плавки з метою отримання потрібної температури поверхні розплавленого металу. А у випадку відхилення температури розплавленого металу в певній зоні ПЄ від заданого значення необхідно змінити траєкторію електронного променя з урахуванням нового температурного стану.

Складність керування полягає в тому, що у випадку коли одна з гармат буде працювати нестабільно чи не буде розплавляти шихту на лінії плавки, за яку вона відповідає, витрата розплаву металу в кристалізатор зменшиться, розплав в інших зонах ПЄ, за які відповідають інші гармати буде перегріватись вище допустимого значення і почне випаровуватись титан. А оскільки в даний час за допомогою методу ЕПП плавлять титанові сплави типу Ti-6Al-4V, то в ситуації з перегрівом з розплаву буде також інтенсивно випаровуватись алюміній, який надає сплаву жаростійкість [12, 62]. В результаті отримується

сплав з хімічним складом відмінним від необхідного та з іншими фізичними властивостями.

Тому важливою задачею є забезпечення зворотного зв'язку по температурі на поверхні розплаву в ПЄ для прогріву розплаву в необхідному температурному діапазоні.

Пропонується контур керування траєкторією руху електронного променя зі зворотним зв'язком по температурі [97, 99] (рис. 3.1). Як приймач теплового випромінювання розплаву застосовується промисловий тепловізор 6, встановлений над ПЄ 4 за оглядовим вікном 5. Оскільки, для уникнення забруднень скла оглядового вікна від бризків розплавленого металу перед ним обертається стробоскоп, то частота відео зйомки синхронізується з частотою обертання стробоскопа, для виключення його впливу на рівні яскравості в отриманих знімках. Покадрова обробка зображень і ідентифікація «холодних» і «гарячих» зон на поверхні проводиться за спеціальними алгоритмами в програмі-обробнику, встановленій на промисловому комп'ютері 7 і працює з тепловізором через плату відеозахоплення. Контур керування траєкторіями руху променя ЕПГ представлено на рис. 3.1.

Контур керування приймає зображення від тепловізора, встановленого під кутом до поверхні розплаву, в спотвореному вигляді. Тому для оцінки теплового стану поверхні розплаву потрібна попередня обробка зображення для виділення і масштабування контрольованої області. На рис. 3.2 наведено цифровий знімок виділеної області плавлення в ПЄ з розплавом.

На наведеному зображенні представлено дві характерні зони: зеленим кольором обведена робоча поверхня ПЄ, в якій відбувається оплавлення шихти, розігрів і попереднє рафінування розплаву; червоним кольором – обведена аномально яскрава зона викликана дією електронного променя по поверхні розплаву. Зона аномальної яскравості може бути ідентифікована системою як зона перегріву розплаву, тому вона відзначена як «безпечна» в ручному режимі, або визначена такою автоматично за місцем розташування. Зелені лінії на малюнку обмежують можливі зони на поверхні ПЄ оброблювані електронним променем у залежності від обраної програми керування траєкторією руху

електронного променю. Ці зони можуть мати різну яскравість, а відповідно і температуру, що дозволить вибирати раціональні програми управління ЕПГ. Перетворене зображення розбивається на окремі зони по усередненій температурі і може виглядати наступним чином (рис. 3.3).

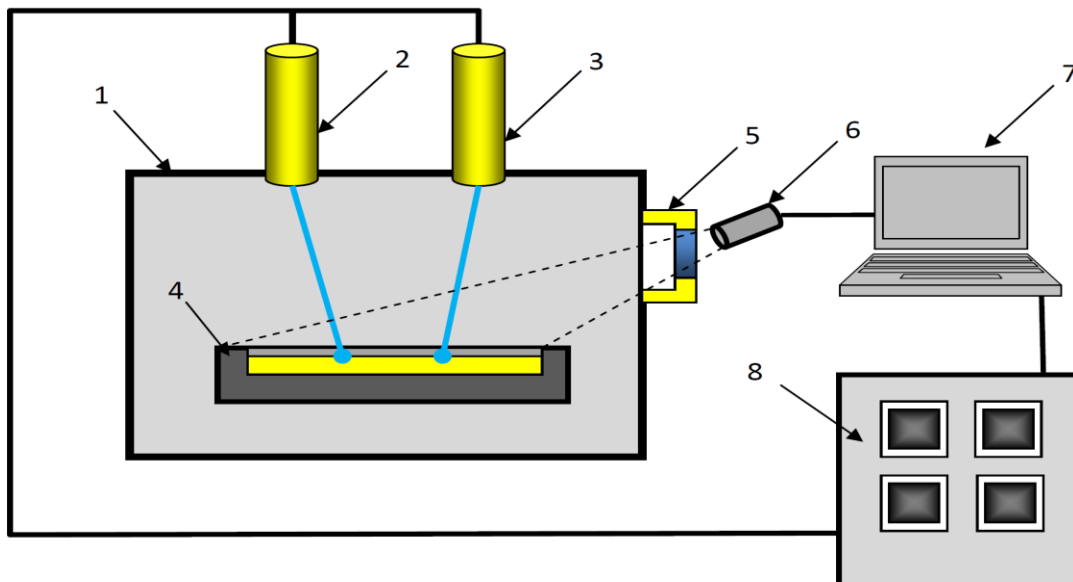


Рис. 3.1. Контур керування траєкторіями руху променю ЕПГ зі зворотним зв'язком по температурі: 1 – корпус установки; 2, 3 – ЕПГ; 4 – ПС; 5 – оглядове вікно; 6 – тепловізор; 7 – промисловий комп'ютер з платою захоплення зображення; 8 – блок керування ЕПГ



Рис. 3.2. Виділення області плавлення в ПС за допомогою програматора: 1 – виділена область ПС; 2 – область дії променю

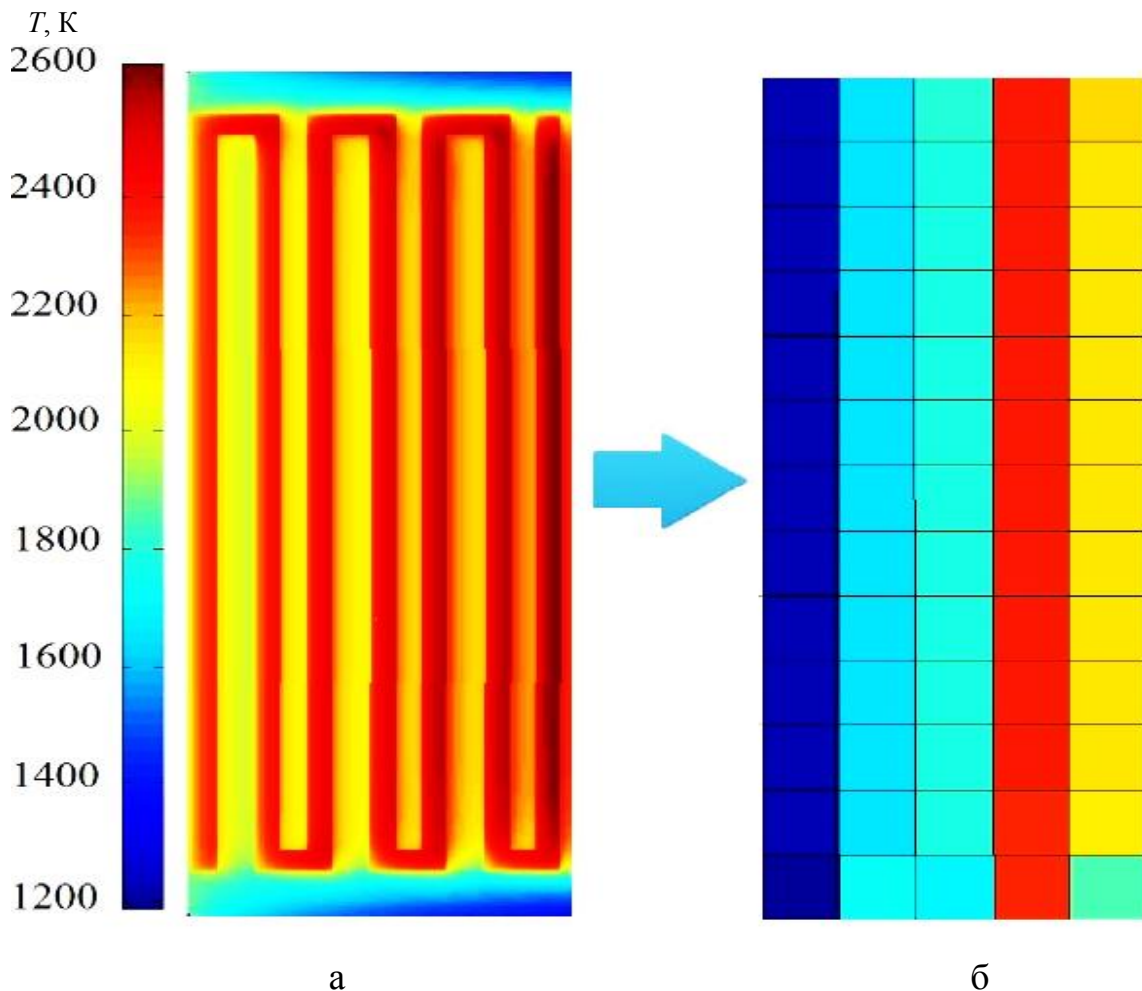


Рис. 3.3 Розбиття температурного поля поверхні ПЄ на умовні квадрати з середньою температурою: а – вихідне зображення температурного поля поверхні ПЄ; б – усереднені по яскравості температурні поля на поверхні ванни

Оскільки сучасний розвиток техніки дає можливість керування траєкторією руху електронного променя в реальному часі від сигналів керуючої системи [55, 75], задачею обігріву розплаву в ПЄ є забезпечення рівномірного прогріву шихтового матеріалу та розплавленого металу по всій її поверхні в необхідному температурному діапазоні, незалежно від зміни швидкості подачі шихти в зону плавки, швидкості течії розплаву в ПЄ чи потрапляння нерозплавленої шихти в центральну зону ПЄ з використанням зворотного зв'язку по температурі.

Для більш ефективної роботи контуру керування ЕПГ пропонується розділити її на контури керування кожної гарматою окремо, а ПЄ ділиться на

чотири прямокутника для кожної ЕПГ (зони впливу ЕПГ), як показано на рис. 3.4.

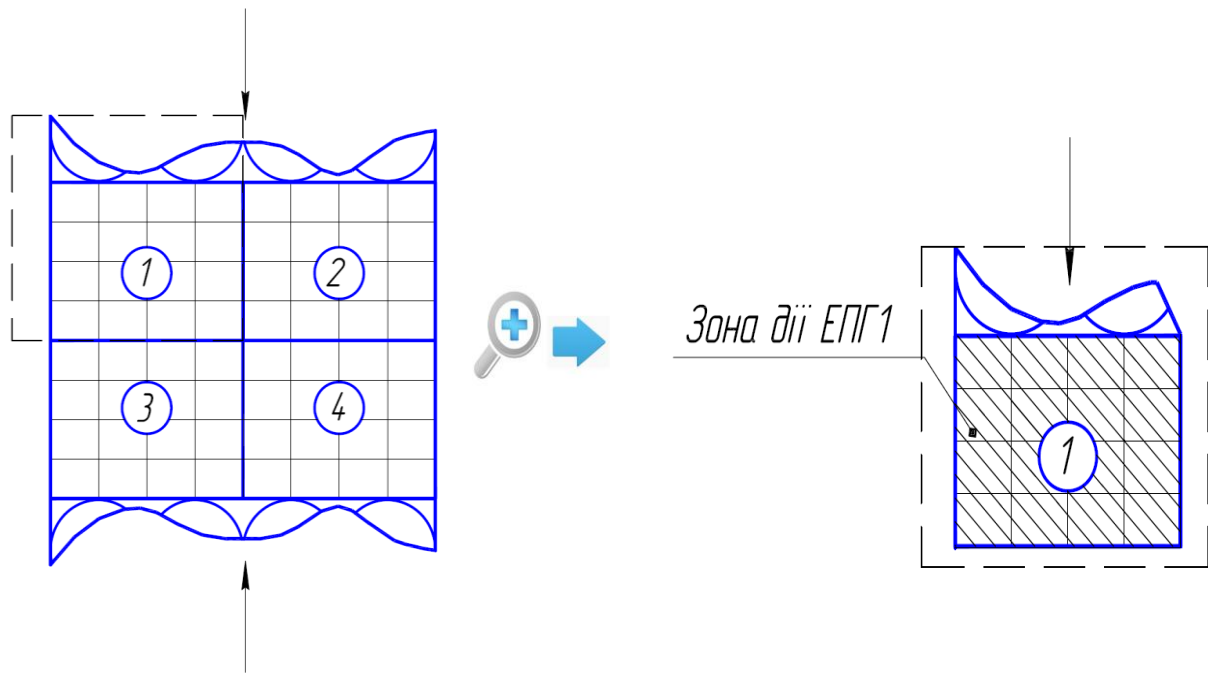


Рис. 3.4. Розділення поверхні ПЄ на зони дії ЕПГ

Окрім цього кожна зона дії ЕПГ додатково розділяється на m квадратів для яких визначається середня температура розплаву за допомогою тепловізора чи відеокамери і на основі певних алгоритмів обігривається ПЄ. Сторона квадрата дорівнює діаметру фокальної плями променю ЕПГ, тобто при обігриві такого квадрату достатньо навести промінь ЕПГ на його центр симетрії.

При моделюванні теплообміну в ПЄ в подальшому дослідженні будуть використані наступні алгоритми керування траєкторією руху електронного променю ЕПГ:

- алгоритм А зі стандартною зигзагоподібною траєкторією руху променю для обігриву поверхні ПЄ ЕПУ типу ВМО та ТІСО-15М (рис. 3.5) (див. Додаток В);

- запропонований алгоритм В, який працює наступним чином: за допомогою тепловізора поверхня ПЄ розбивається на квадрати зі стороною $2r_0$ та через певний період t_a (в випадку моделювання – $t_{\text{пер}} = 2$ с) визначається середня температура кожного квадрату після чого вибирається певна кількість

квадратів $k_{хол}$ з найнижчою середньою температурою і кожен з цих квадратів обігрівається в порядку зростання середньої температури) (див. Додаток Г);

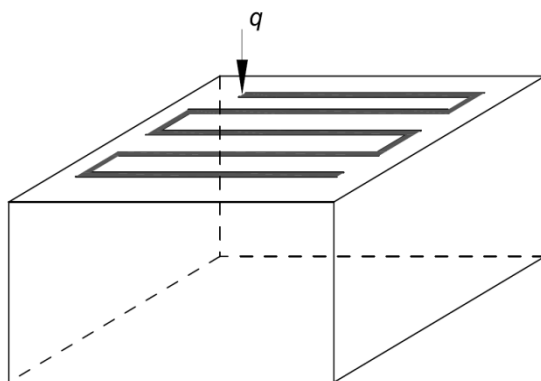


Рис. 3.5. Траекторія електронного променя для алгоритму А

- запропонований алгоритм С, який працює подібно до алгоритму В, однак крім найхолодніших квадратів додатково обігріваються чотири квадрати з центрами у вершинах найхолодніших квадратів. Це зумовлено експоненціальним характером розподілу питомої потужності в електронному промені [85] (рис. 3.6), в результаті чого вершини не отримують достатньої кількості тепла для підтримання температури вище температури плавлення) (див. Додаток Г).

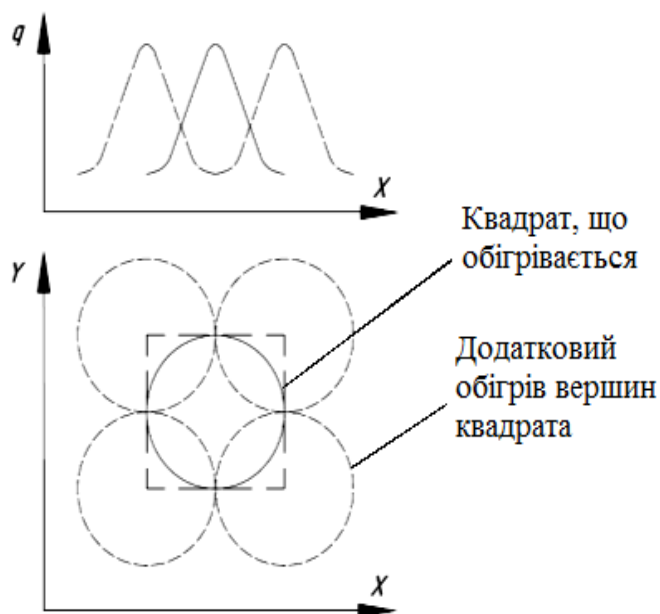


Рис. 3.6. Розподіл питомої потужності теплового потоку по алгоритму С з урахуванням експоненційного розподілу потужності в електронному промені

3.2. Порівняння алгоритмів керування траєкторією руху електронного променя та вибір раціонального для обігріву розплаву в проміжній ємності

3.2.1. Обігрів розплаву при відсутності нерозплавлених шматків шихти

На першому етапі було проведено ряд моделювань роботи алгоритмів А, В та С для випадку коли весь об'єм титанового розплаву в ПЄ в початковий момент має температуру вищу за температуру плавлення 1950 К. Тривалість моделювання $t = 40$ с, періодичність аналізу температурного стану розплаву на поверхні ПЄ для алгоритмів В та С $t_{\text{пер}} = 2$ с. Відмінністю від попередніх моделювань проведених в розділі 2 є те, що кожен часовий крок обігривається тільки частина площі ПЄ, круг радіусом r_0 . Тобто імітуються вистріли ЕПГ по розплаву.

З представленого на рис. 3.7 розподілу температур в ПЄ при русі електронного променя згідно алгоритму А можна зробити висновок, що розплав прогривається рівномірно і знаходиться в необхідному температурному інтервалі (1950...2200 К) за виключенням зон прилеглих до охолоджуваних стінок та дна ПЄ. Зауважимо, що температура зон прилеглих до стінок та дна ПЄ повинна бути нижче за температуру плавлення титану для уникнення пошкодження ПЄ [34].

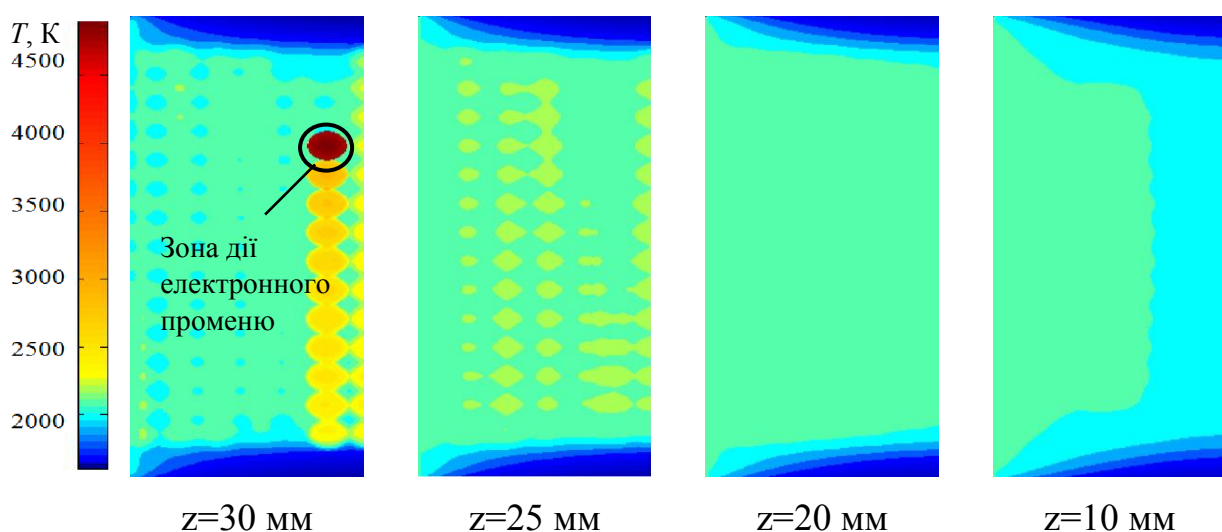


Рис. 3.7. Розподіл температури розплаву в ПЄ на різній висоті при використанні алгоритму А

При використанні алгоритму В (рис. 3.8) розплав прогривається нерівномірно, і в середині ПЄ розплав починає охолоджуватись через нерівномірний розподіл теплового потоку та радіаційне випромінювання тепла з поверхні розплаву. Температура в середній частині ПЄ опускається нижче температури плавлення розплаву, тому при такому алгоритмі керування траєкторією руху електронного променя відбуватиметься кристалізація металу і можливе його потрапляння з ПЄ до кристалізатора, що є неприпустимим. Тобто, використання такого алгоритму керування траєкторією руху електронного променя не може забезпечити рівномірність розподілу температур в необхідному температурному діапазоні навіть при стаціонарних умовах і в подальших дослідках алгоритм В не використовувався.

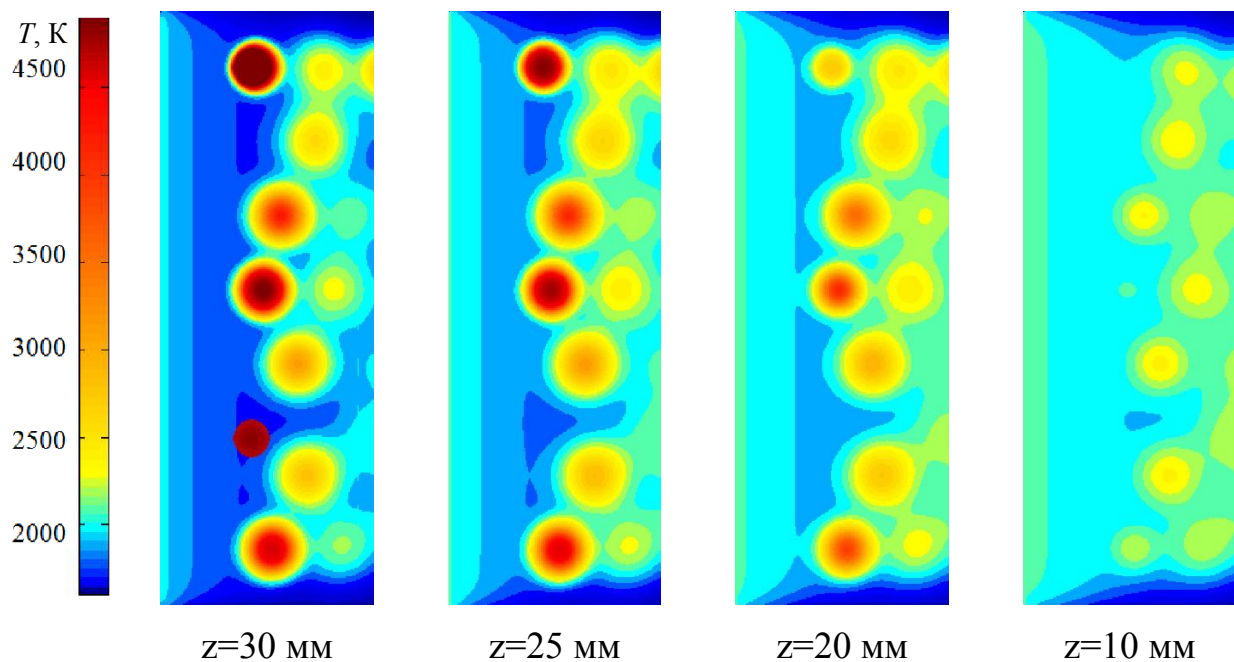


Рис. 3.8. Розподіл температури розплаву в ПЄ на різній висоті при використанні алгоритму В

На рис. 3.9 представлено розподіл температур отриманих при використанні алгоритму С. Розплав титану знаходиться в необхідному температурному діапазоні за виключенням зон прилеглих до охолоджуваних стінок та дна ПЄ. Однак в порівнянні із температурними полями, отриманими

при використанні алгоритму А розподіл температур в області ПЄ не рівномірний і є більше перегрітих зон.

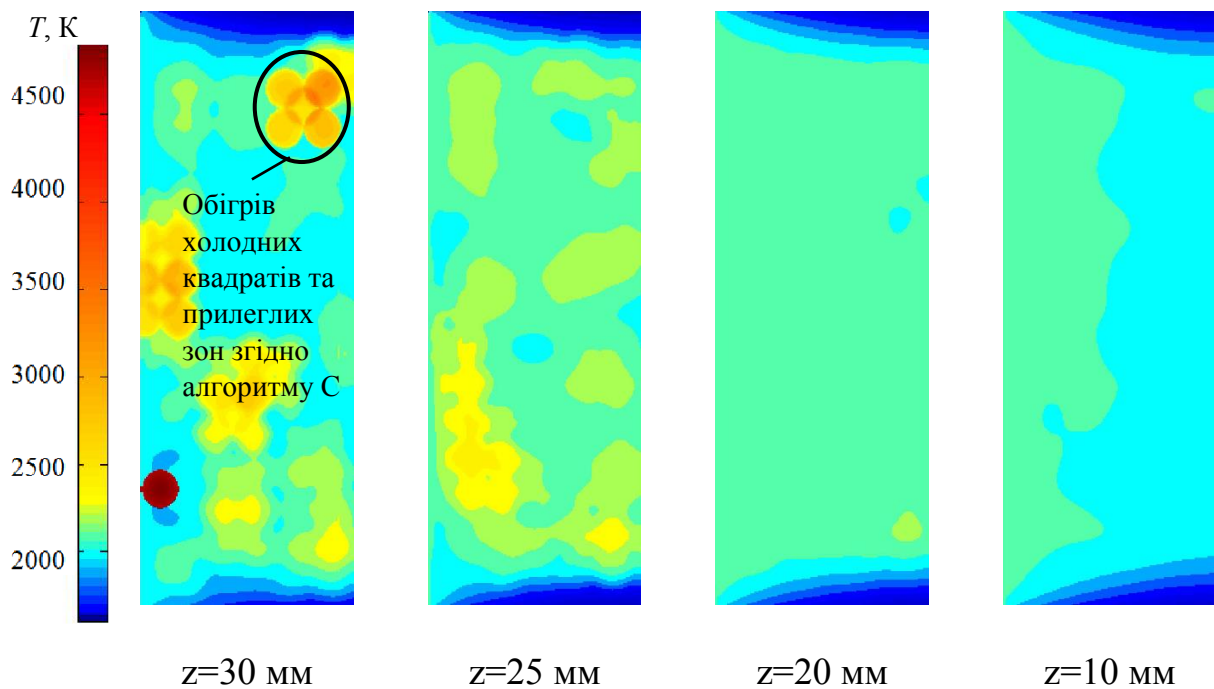


Рис. 3.9. Розподіл температури розплаву в ПЄ на різній висоті при використанні алгоритму С

Виходячи з отриманих результатів, для подальшого моделювання випадку потрапляння шматка нерозплавленої шихти в ПЄ будуть використовуватись алгоритми А та С.

3.2.2. Обігрів розплаву при наявності нерозплавлених шматків шихти

Для вибраних алгоритмів керування розглянемо ситуацію, коли в розплав потрапляє умовний шматок шихти з розмірами $30\text{мм}\times 45\text{мм}\times 5\text{мм}$ та температурою 300 K (початкові умови 2.3 змінюються).

При моделюванні тепло-масообміну в ПЄ з рухом променя згідно алгоритму зі стандартною зигзагоподібною траєкторією руху променя А титановий розплав прогривається рівномірно (рис. 3.10). Але у зв'язку з

відсутністю зворотного зв'язку по температурі на поверхні ПЄ умовний шматок шихти обігривається тільки при проходженні через нього електронного променя по заданій траєкторії та через теплообмін з розплавом, що з ним контактує. Такого обігріву для нагріву умовного шматка шихти до температури вищої за температуру плавлення титану недостатньо (рис. 3.10). Як видно з розподілу температур в ПЄ умовний шматок шихти не тільки не встигає прогрітись до необхідної температури (рис. 3.10 $z=30$ мм та $z=25$ мм), а також забирає більшу частину теплового потоку електронного променя, тим самим охолоджуючи розплав навколо себе (рис. 3.10 $z=20$ мм та $z=10$ мм). В цьому випадку можлива кристалізація розплаву під шихтою. Як результат – кристалізований метал може забити зливний носок чи потрапити в кристалізатор, порушуючи однорідну структуру зливку і створюючи додаткові концентратори напружень в ньому.

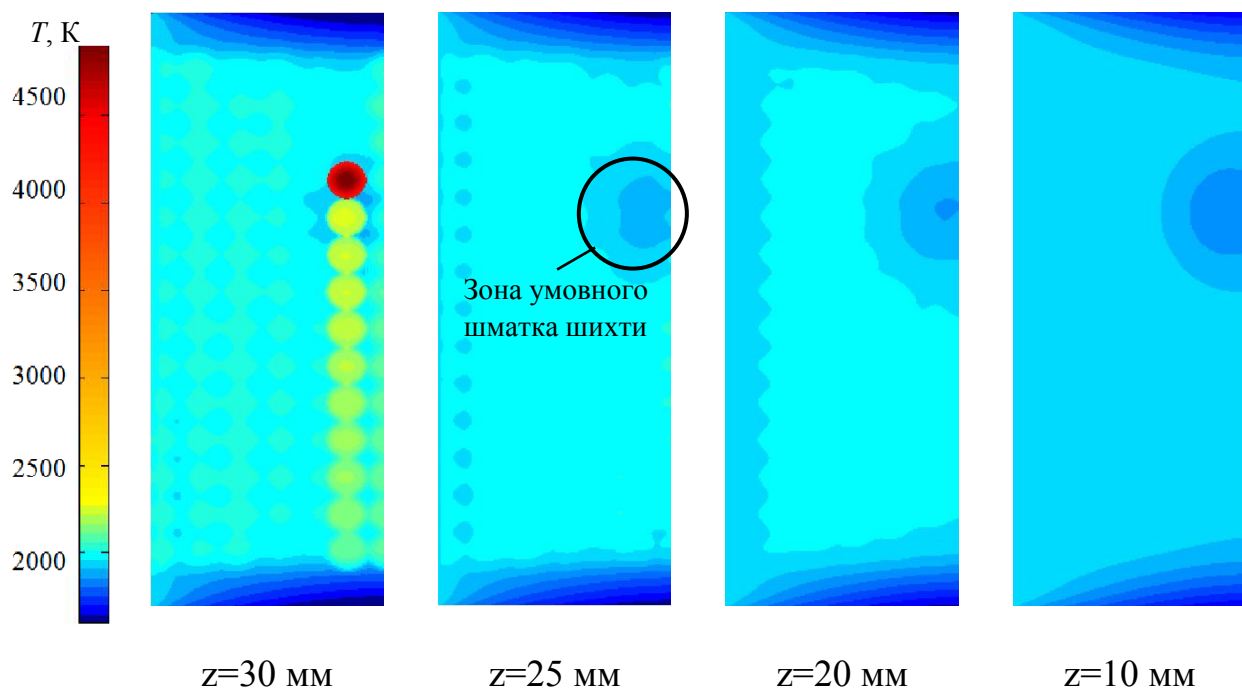


Рис. 3.10. Розподіл температури розплаву в ПЄ на різній висоті за наявності шматка шихти при використанні алгоритму А

На рис. 3.11 показані результати моделювання тепло-масообміну в ПЄ з використанням алгоритму С. На відміну від попереднього випадку, шматок

шихти повністю розплавляється і забезпечується необхідний діапазон температур розплаву в ПЄ.

Порівнявши результати моделювання двох алгоритмів керування траєкторією руху електронного променя можна зробити висновок, що використання алгоритму А дозволяє рівномірно прогріти розплав при відсутності шматків шихти, але не може забезпечити розплавлення шихти у випадку їх потрапляння в ПЄ.

З іншого боку, запропонований алгоритм С забезпечує необхідний діапазон температур титанового розплаву в ПЄ незалежно від наявності шихти в ньому, але не дозволяє прогріти розплав рівномірно.

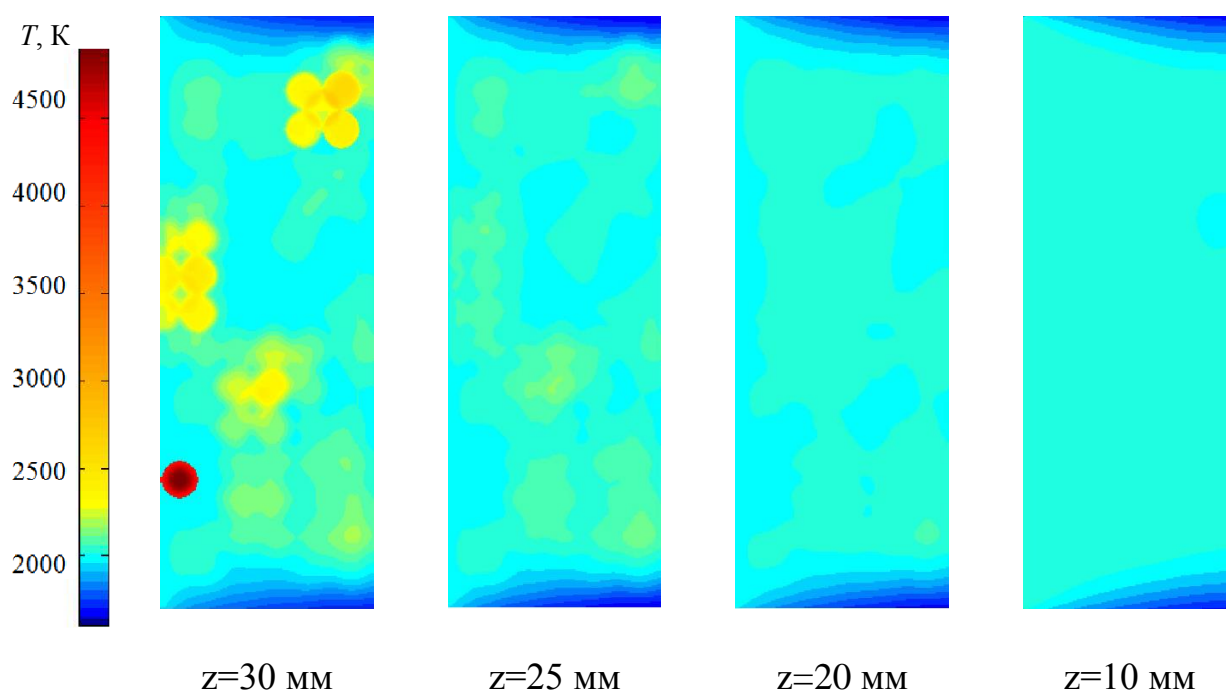


Рис. 3.11. Розподіл температури розплаву в ПЄ на різній висоті за наявності шматка шихти при використанні алгоритму С

3.3. Розробка та аналіз роботи розробленого узагальненого алгоритму керування траєкторією руху електронного променя

При створенні нового розробленого узагальненого алгоритму керування траєкторією руху електронного променя D (рис. 3.12) було використано два алгоритми [133] (див. додаток Д):

- алгоритм А – використовується коли середня температура всіх квадратів вища за температуру плавлення - 1950 К;
- алгоритм С – використовується, коли середня температура окремих квадратів нижче 1950 К і обігрівується тільки мінімальна задана кількість «холодних» квадратів.

Розроблений узагальнений алгоритм D працює наступним чином:

1. Згідно з алгоритмом С ПЄ розбивається на m квадратів, і на початку технологічного процесу або коли поточний час перебігу процесу $t_{\text{пот}}$ дорівнює часу періоду $t_{\text{пер}}$ – система визначає $k_{\text{хол}}$ найхолодніших квадратів, та у випадку, якщо мінімальна середня температура квадратів T_{min} менше допустимої температури $T_{\text{доп}}$ система почне обігрівати холодні квадрати починаючи з поточного квадрату $k_{\text{пот}}$ та чотири прилеглі зони до нього (алгоритм С) протягом п'яти часових кроків Δt (по одному часовому кроку на холодний квадрат та прилеглі зони).

2. Після закінчення обігріву холодних квадратів система продовжить роботу в режимі алгоритму А, починаючи з квадрата $m_{\text{пот}}$, до моменту часу початку нового аналізу температурного стану поверхні ПЄ $t_{\text{пот}} = t_{\text{пер}}$. Після цього увесь цикл повториться.

3. У випадку якщо мінімальна середня температура T_{min} вища допустимої $T_{\text{доп}}$ – система весь період $t_{\text{пер}}$ буде обігрівати розплав в ПЄ за алгоритмом А продовжуючи з квадрата $m_{\text{пот}}$. При необхідності в технологічний процес може втрутитись оператор і зупинити його (сигнал $S_{\text{оп}}$).

Керування траєкторією електронного променя згідно алгоритму D використано при моделюванні ситуації потрапляння нерозплавленої шихти в ПЄ. Результати моделювання представлені на рис. 3.13.

Шматок шихти повністю розплавляється. На висоті $z=25$ мм, $z=20$ мм та $z=10$ мм метал має температуру вище 1950 К, тобто немає ознак того, що в процесі розплавлення шматка шихти під ним відбувалась кристалізація розплаву.

На рис. 3.14 показаний розподіл температури на поверхні ПЄ (рис. 3.14а) та на висоті $z=25$ мм (рис. 3.14б) в різні моменти часу. Протягом перших 14 секунд алгоритм D працює в режимі А+С. На поверхні шматок шихти повністю

розплавлюється. На висоті 25 мм розплавлення умовного шматка шихти відбувається довше оскільки відсутній прями обігрів променем, а метал обігрівається за рахунок теплообміну між шарами розплаву.

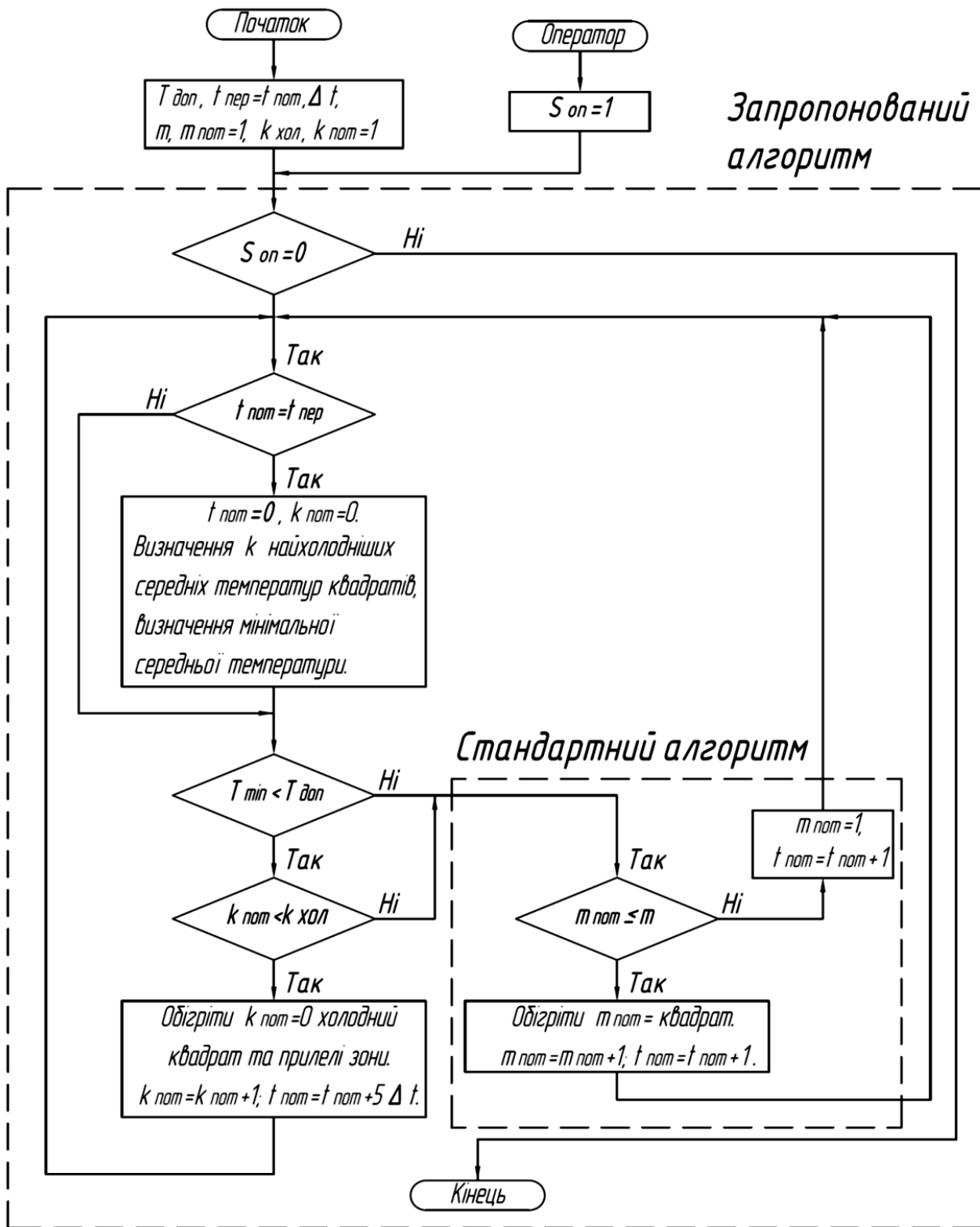


Рис. 3.12. Схема розробленого узагальненого алгоритму керування траєкторією руху електронного променя D

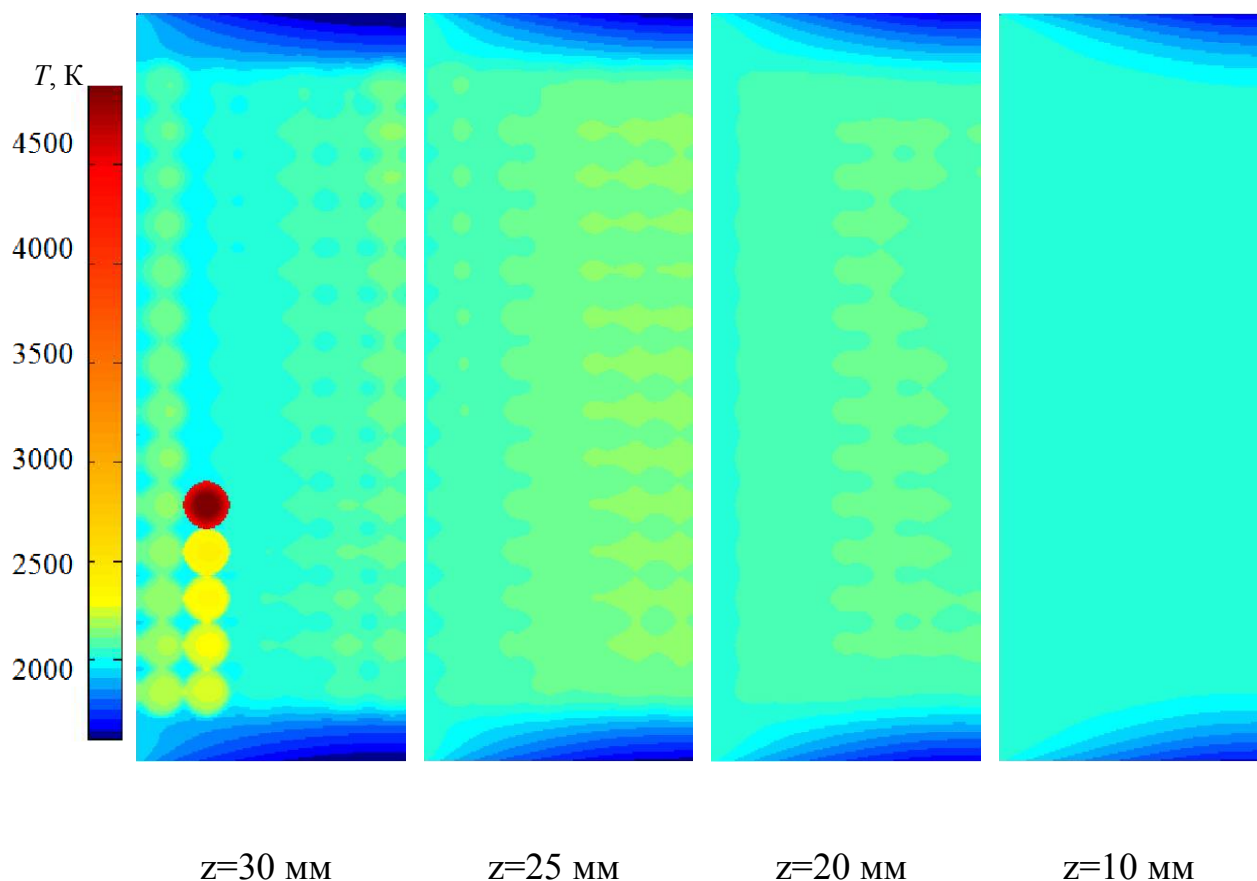


Рис. 3.13. Розподіл температури в ПЄ по висоті при використанні алгоритму D та наявності шихти в розплаві

На 16 секунді температура розплаву в ПЄ розподілена рівномірно і знаходиться в необхідному температурному інтервалі. Починаючи з 16 секунди середні температури квадратів перевищують температуру плавлення титану і алгоритм D працює в режимі A.

Отже прогнозується, що використання алгоритму D при керуванні траєкторією руху електронного променя забезпечить прогрів розплаву в необхідному температурному діапазоні, незалежно від потрапляння шихти в зону плавки ПЄ, а також необхідну витрату розплаву в кристалізатор для отримання зливку з необхідним хімічним складом та якісною поверхнею зливку.

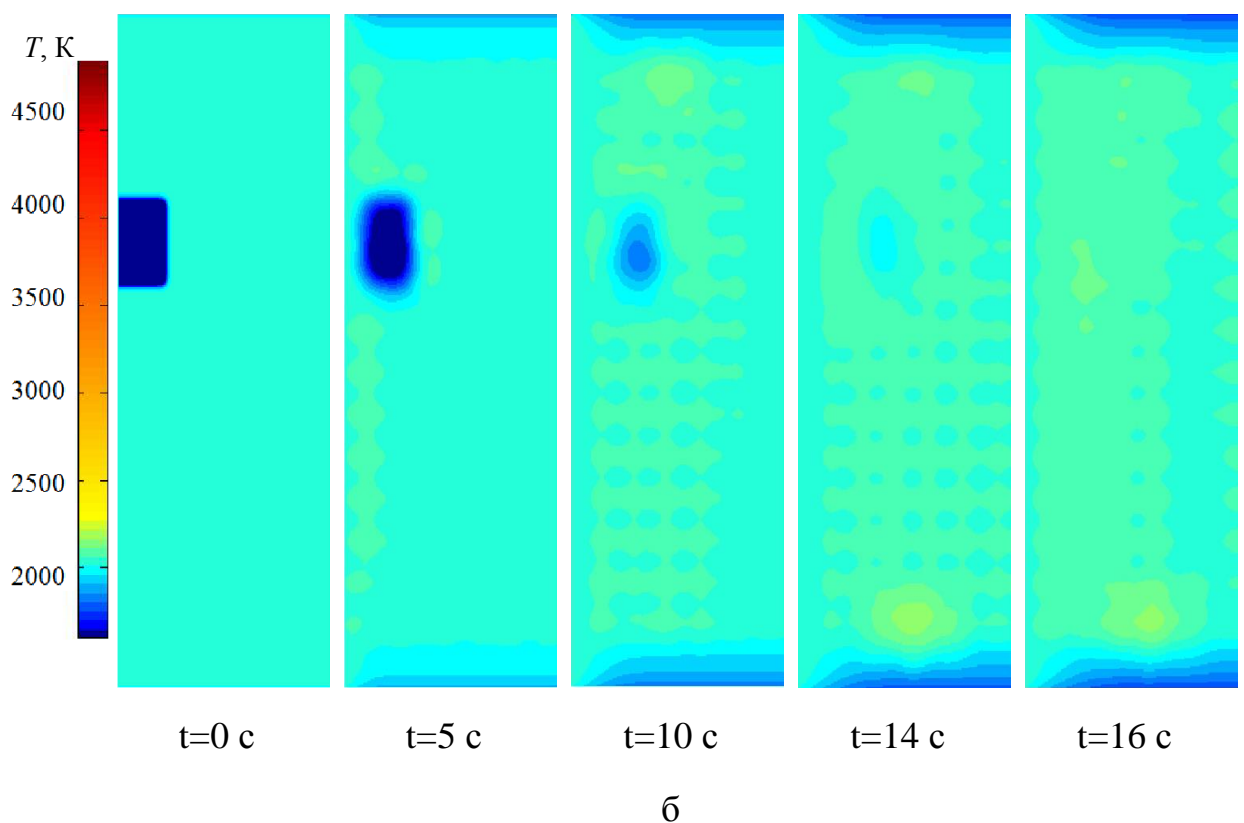
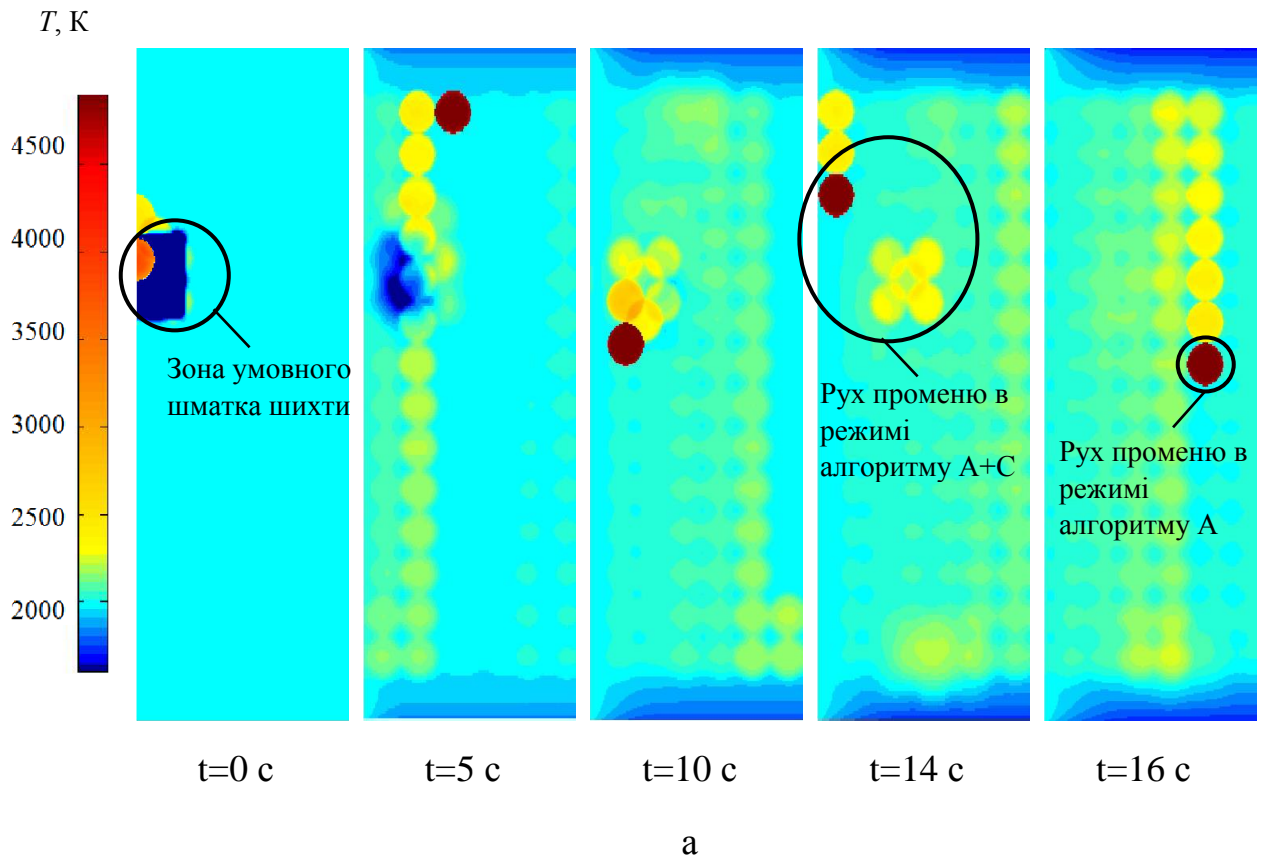


Рис. 3.14. Розподіл температури при використанні алгоритму D:
а – $z=30$ мм; б – $z=25$ мм

3.4. Керування траєкторією руху електронного променю при одночасній роботі декількох електронно-променевих гармат

В розділі 2 запропонована принципова схема механотронної системи керування виплавою титану. Рациональне використання потужностей ЕПГ та ЕПУ в цілому є одними з головних умов економії електроенергії під час процесу виплавки титанових зливків методом ЕПП [47].

В сучасних ЕПУ кількість ЕПГ складає від двох до семи в залежності від виходу металу за одиницю часу. В установці ТІСО-15М кількість ЕПГ – 4, ВМО – 7 [45, 54]. Керування роботою ЕПГ включає в себе: регулювання потужності кожної з ЕПГ за рахунок зміни подачі суміші водню та кисню в камеру ЕПГ, а також задача програми руху траєкторії електронного променю з декількох стандартних для кожної ЕПГ.

Тобто, процес керування ЕПГ залежить тільки від досвіду та суб'єктивних дій оператора, який спостерігає за плавкою протягом робочої зміни тривалістю 2 години. В зв'язку з довготривалістю та складністю процесу, оператор сприймає навантаження, в результаті чого з часом він втомлюється, концентрація уваги знижується, що може призвести до помилок в процесі обігріву титанового розплаву в ПЄ, які можуть привести до погіршення якості зливку та додаткових витрат електроенергії.

Важливою задачею при керуванні ЕПУ в цілому є коректний перерозподіл потужностей ЕПГ над ПЄ, оскільки можливі випадки коли в ЕПУ типу ВМО з одного бункеру в зону плавки буде потрапляти більше шихтового матеріалу ніж з іншого. В такому випадку з однієї сторони ПЄ буде не вистачати потужності для розплаву шихти і буде менша витрата розплаву через зливний носок. Це призведе до збільшення часу обігріву розплаву з іншої сторони ПЄ та його перегріву з інтенсивним випаровуванням легуючих домішок (у випадку плавки сплаву Ti-6Al-4V).

Для уникнення такого явища пропонується метод керування траєкторією руху електронного променя при одночасній роботі декількох ЕПГ для розподілу потужності обігріву по поверхні ПЄ (рис. 3.15) [105].

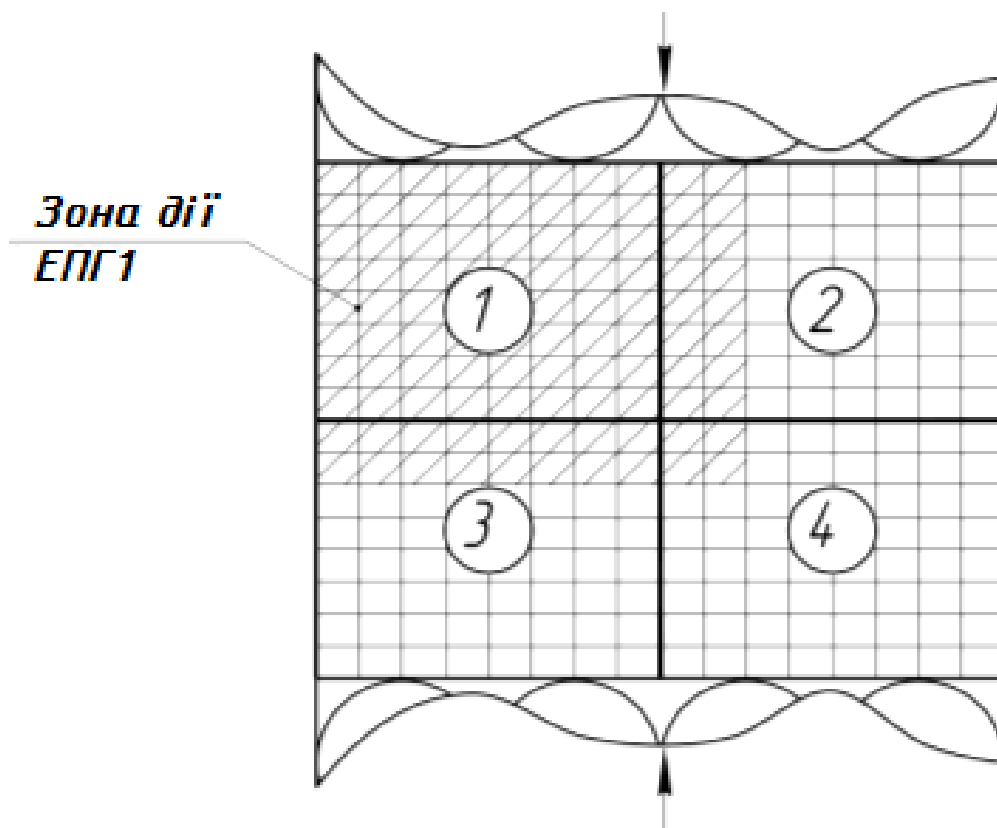


Рис. 3.15. Розподіл ПЄ на зони обігріву ЕПГ та зона досяжності променю ЕПГ 1

Згідно алгоритму (рис. 3.16) при одночасній роботі декількох ЕПГ ПЄ розбивається на зони дії цих ЕПГ та на квадрати згідно алгоритму D. При аналізі середніх температур в зонах ЕПГ у випадку, якщо в одній зон (2, 3 та 4) відсутня максимальна кількість квадратів ($k_{хол}$) з температурою меншою за мінімальну температуру T_{min} , а в зоні прилеглий до неї їх більше ніж $k_{хол}$ і вони потрапляють в зону досяжності ЕПГ 1 (рис. 3.15) – вони будуть обігріті згідно алгоритму D, але за допомогою ЕПГ 1 [101]. Таким чином можливо підвищити ефективність обігріву титанового розплаву в ПЄ за рахунок перерозподілу потужності ЕПГ.

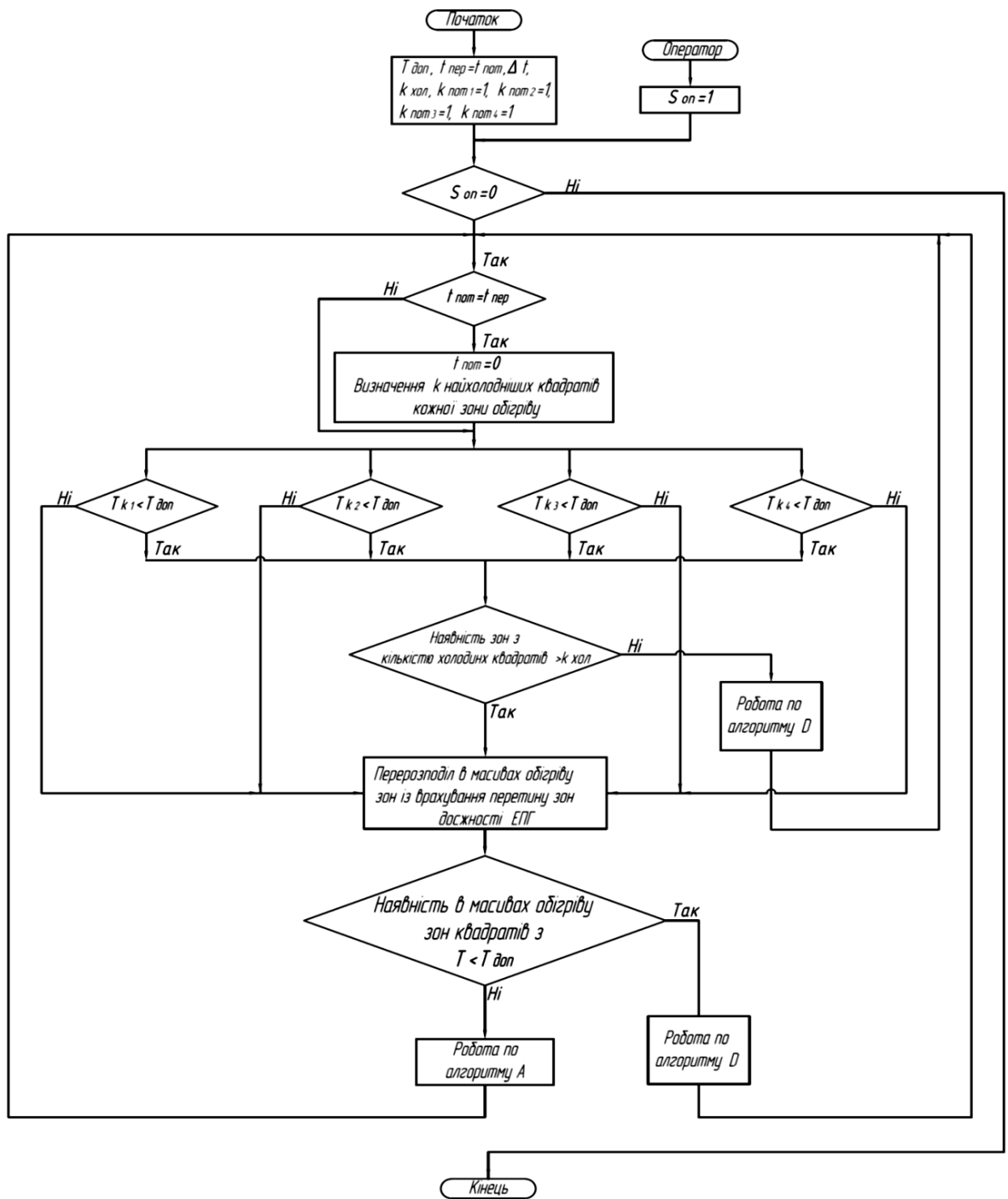


Рис. 3. 16. Алгоритм керування траєкторіями руху електронних променів з урахуванням одночасної роботи декількох ЕПГ

На рис. 3.17а...3.17в показано, що у зв'язку з великою кількістю непрогрітих квадратів в зоні обігріву ЕПГ 1 їх починає додатково прогрівати ЕПГ 2, після чого обігрів продовжується за стандартною зигзагоподібною траєкторією ЕПГ в своїх зонах дії (рис. 3.17г).

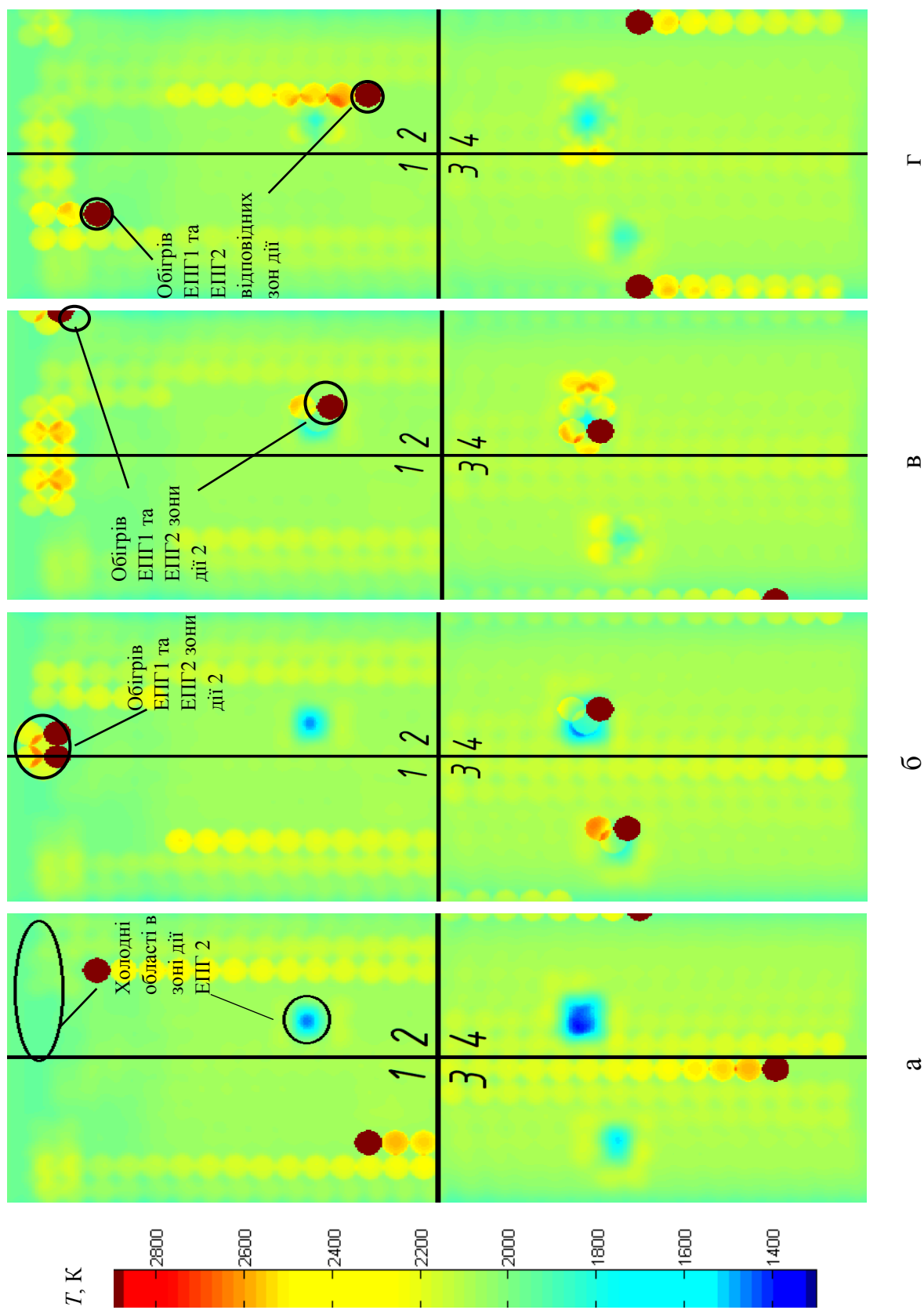


Рис. 3.17. Перерозподіл потужності обігріву між зонами дії ЕПГ 1 та 2

Очікується, що запропонований метод керування декількома ЕПГ підвищить рівномірність прогріву титанового розплаву в ПЄ в необхідному температурному діапазоні за рахунок перерозподілу потужностей обігріву між зонами ЕПГ.

3.5. Висновки

1. При створенні нового алгоритму керування траєкторією руху електронного променя ЕПГ запропоновано нові підходи щодо реалізації зворотного зв'язку по температурі розплаву із розбиттям поверхні ПЄ на квадрати з періодичним визначенням середньої температури квадратів для подальшого їх обігріву на основі аналізу теплового стану поверхні ПЄ.

2. В процесі моделювання порівняно обігрів розплаву в ПЄ згідно алгоритму зі стандартною зигзагоподібною траєкторією руху променя, запропонованого алгоритму з почерговим обігрівом певної кількості найхолодніших квадратів та алгоритму з почерговим обігрівом певної кількості найхолодніших квадратів та чотирьох прилеглих квадратів у випадку відсутності та наявності в ПЄ зон з умовними шматками нерозплавленої шихти.

3. Для подальших чисельних експериментів вибрано алгоритм зі стандартною зигзагоподібною траєкторією руху променя та запропонований алгоритм з почерговим обігрівом певної кількості найхолодніших квадратів та чотирьох додаткових квадратів, оскільки вони прогривають і підтримують температуру розплаву в необхідному діапазоні.

4. Запропоновано об'єднати два раніше обраних алгоритми в розроблений узагальнений алгоритм керування траєкторією електронного променя. Проведене математичне моделювання руху електронного променя згідно розробленого узагальненого алгоритму при умові потрапляння в ПЄ умовного шматка нерозплавленої шихти. Отримані температурні поля показують, що при керуванні траєкторією руху електронного променя згідно розробленого алгоритму повністю розплавляються шматки шихти, а також

рівномірно прогривається розплав в усьому об'ємі ПЄ в необхідному температурному діапазоні.

5. Запропоновано спосіб керування траєкторіями руху електронних променів при одночасній роботі декількох ЕПГ. Очікується, що використання запропонованого способу в порівнянні з існуючим стандартним зигзагоподібним алгоритмом траєкторії руху електронного променя дозволить зменшити час виплавки одного зливку, енерговитрати технологічного процесу та зменшити втрати на випаровування титану та легуючих домішок з розплаву.

6. Розроблено контур керування траєкторією електронного променя зі зворотним зв'язком по температурі за допомогою тепловізора та методу керування траєкторіями руху електронних променів при одночасній роботі декількох ЕПГ, який дозволяє отримати рівномірні температурні поля в діапазоні 1950...2200К, а також визначати оптимальну подачу шихти в зону плавки для будь-яких геометричних та термодинамічних параметрів в ПЄ, для прогріву розплаву в необхідному температурному діапазоні і як результат отримання зливку з необхідним хімічним складом.

7. Прогнозується, що використання методу керування траєкторіями руху електронних променів при одночасній роботі декількох ЕПГ забезпечить стабільну витрату титанового розплаву з ПЄ в кристалізатор в необхідному діапазоні, який буде відповідати параметрам швидкості кристалізації зливку та його витягування з кристалізатора, для зниження вірогідності утворення на його поверхні дефектів.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень даного розділу наведено в таких публікаціях:

1. Грабовський Г.Г. Механотронна система керування плавкою титану. Постановка задачі. / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Промислова гідравліка та пневматика. – 2012. – № 1 (35). – С.101 – 105.

2. Грабовський Г.Г. Керування температурою титанового розплаву в проміжній ємності при електронно-променевої плавці. / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Автоматика: Матеріали доповідей XX міжнародної конференції з

автоматичного управління, присвяченої 100-чю з дня народження академіка НАНУ О.Г. Івахненка. – Миколаїв: Національний університет кораблебудування, 2013. – С.181.

3. Цибрій Ю.О. Алгоритм керування траєкторією електронного променя при плавці титану / Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XXI міжнародної науково-технічної конференції. – К., 2016. – С.121 – 123.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА КОНТУРУ ВИТЯГУВАННЯ ЗЛИВКУ З КРИСТАЛІЗАТОРА

Розроблено спосіб та алгоритм витягування зливку з кристалізатора з подачею на нього додаткових коливань за заданим законом. Розроблено конструкцію ГМВМ та досліджено НДС мембран ГМВМ за допомогою чисельних методів. Проведено аналіз отриманих результатів та запропонована інженерна методика вибору раціональних геометричних параметрів мембран ГМВМ.

4.1. Контур витягування зливку з кристалізатора

4.1.1 Обґрунтування необхідності подачі додаткових коливань на зливки

Як зазначалося в розділі 1 основними причинами утворення дефектів на поверхні титанових зливків при їх витягуванні з кристалізатора ЕПУ є утворення крихкої корони зливку на стінках кристалізатора з неоднорідною структурою та хімічним складом та сприйняття зливком додаткових сил тертя в момент його початку руху, в результаті чого тріскається щойноутворена тонка поверхня зливку і в тріщини затікає розплавлений метал.

В роботі [84] експериментально доведено, що додаткова сила тертя, яку сприймає зливки в момент початку витягування вдвічі більша за силу тертя при подальшому його витягуванні і прямопропорційна значенню діаметра зливка. Тому є доцільним забезпечення постійного руху зливку в кристалізаторі.

Подібні дефекти також виникають на поверхні зливків при безперервній розливці сталі [88, 89]. Як приклад, для їх уникнення пропонується подавати на кристалізатор додаткові коливання через важільний механізм з гідравлічним чи механічним приводами за синусоїдним та несинусоїдними законами, в залежності від швидкості виходу кристалізованого сталевих зливку з

кристалізатора [69]. При цьому втрати матеріалу при подальшій обробці слябів зменшуються на 3% [7, 8]. Подібні методи боротьби з дефектами поверхні можуть бути використані і при виплавці титанових сплавів методом ЕПП. Очікується зниження втрати маси зливка з 10% до 7%.

Однак подача коливань на кристалізатор при ЕПП складна в реалізації, оскільки, така плавка відбуваються в глибокому вакуумі, об'єм плавильної камери ЕПУ обмежений і усі приводи механізмів знаходяться поза камерою, а до всіх ущільнень ставляться підвищенні вимоги. Ймовірний монтаж приводу коливання кристалізатора в плавильній камері значно збільшить її розміри, а надійно та якісно ущільнити увесь стіл хитання кристалізатора є складною та дорогою операцією [105].

Для забезпечення будь-якого необхідного закону коливання з мінімальним втручанням в конструкцію ЕПУ доцільне використання гідравлічного приводу. На даний момент при ЕПП в якості гідравлічного двигуна використовують довгоходові гідроциліндри. Коливання подаються на зливков гідроциліндром зі штоком з'єднаним з ним через з'єднання «ластівчин хвіст» [3]. Але використання гідравлічних циліндрів при витягуванні зливку з кристалізатора під час ЕПП обмежується довжиною зливку. Технологічно можливе отримання титанового зливку на ЕПУ типу ВМО довжиною до 4 м [45], тому для встановлення такого гідравлічного циліндру необхідне додаткове заглиблення ще на 4 м з врахуванням габаритів гідроциліндра у витягнутому та втягнутому положенні. Також до ущільнень з'єднань гідроциліндра шток-кришка ставляться підвищенні вимоги, оскільки плавка відбувається в умовах підвищеної пожежної небезпеки.

Виходячи з вищесказаного важливою задачею є розробка нового контуру та способу витягування титанового зливку з кристалізатора при ЕПП для ЕПУ типу ТІСО-15М та ВМО, які забезпечать подачу коливань та зниження сил тертя, що сприймаються зливком, і як результат, зменшать утворення дефектів на його поверхні при мінімальних втручаннях в конструкцію існуючої ЕПУ.

4.1.2 Спосіб витягування зливку з кристалізатора при ЕПП

Поставлена задача в п. 4.1 вирішується за рахунок того, що в контур витягування зливка з кристалізатора вводиться додатковий гідравлічний привід [35], а саме на рухому платформу гвинтової передачі додатково встановлюється гідравлічний мембранний виконавчий механізм (ГМВМ), до якого прикріплюється шток, що безпосередньо витягує зливки з кристалізатора [73, 74].

На рис. 4.1 представлена принципова схема контуру витягування зливка з кристалізатора.

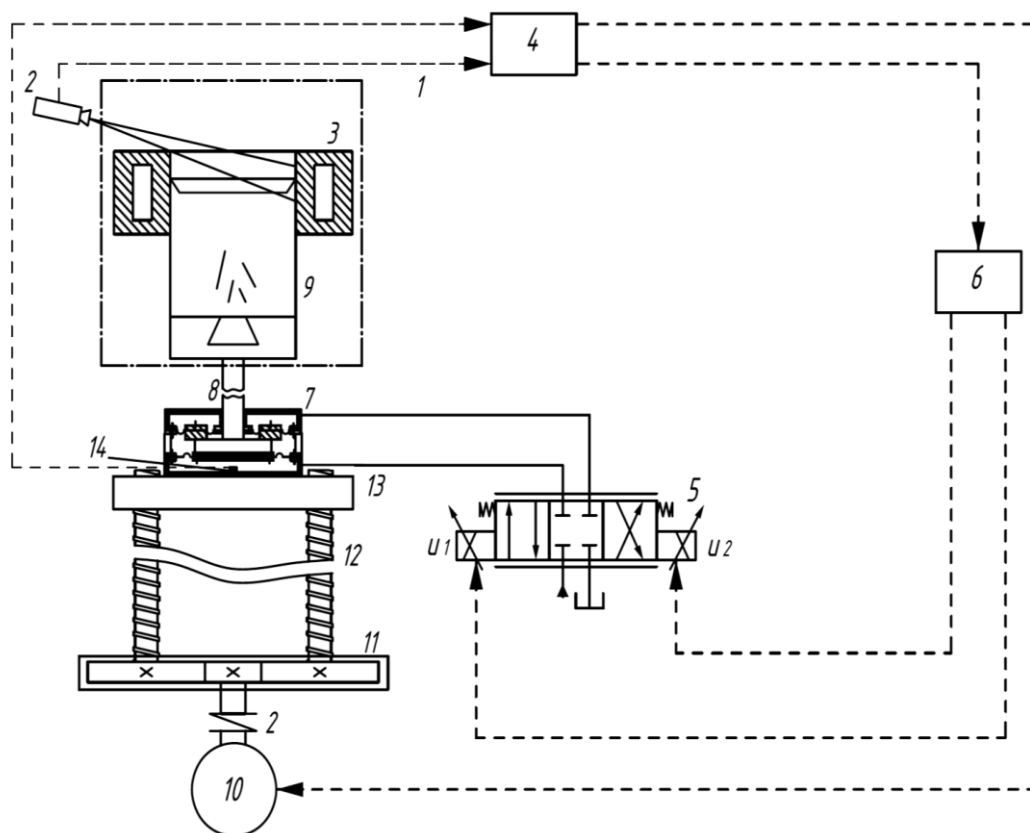


Рис. 4.1. Контур керування витягуванням зливку з кристалізатора

В контур витягування зливку з кристалізатора [42] входять плавильна камера 1, в якій встановлена відеокамера 2, яка відслідковує рівень розплавленого титану, що постійно зливається в кристалізатор 3. Відеосигнал від відеокамери 2 передається на блок керування 4. Блок керування у відповідності з закладеними в ньому алгоритмами передає керуючі сигнали на пропорційні

електромагніти гідророзподільника 5 через блок керування 6, після чого робоча рідина від гідророзподільника поступає до гідравлічного приводу 7, який переміщує шток 8 зі зливком 9. Також залишається витягування зливку з кристалізатора за допомогою існуючого приводу, в який входять електродвигун 10 з редуктором 11 та гвинтовою передачею 12 для переміщення платформи 13. Датчик переміщення 14 відслідковує хід гідравлічного приводу 7.

Алгоритм витягування зливку з кристалізатора полягає в наступному (рис. 4.2). В початковий момент при відсутності сигналу на вимкнення ($S_{\text{оп}} = 0$) подається сигнал $u_1 = u_0$ для позиціонування гідравлічного приводу, так щоб поточний хід $s_{\text{пот}}$ відповідав максимальному верхньому s_{max} ($s_{\text{пот}} = s_{\text{max}}$).

Після цього подається команда на витягування зливку з кристалізатора електродвигуном ($U_E = U_0$), до моменту коли рівень розплаву в кристалізаторі не стане рівним максимальному $h = h_{\text{max}}$. По завершенні позиціонування починається безпосередній процес подачі коливань на зливков: подається сигнали на електромагніти гідророзподільника $u_1 = 0$ та $u_2 = u_0$ на опускання зливку до рівня h_{min} , потім відбувається знову прямий хід ($u_1 = u_0$ та $u_2 = 0$) до максимального рівня $h = h_{\text{max}}$. Надалі увесь цикл повторюється доки значення поточного ходу буде в межах між мінімальним та максимальним допустимими ходами гідравлічного приводу $s_{\text{min}} \leq s_{\text{пот}} \leq s_{\text{max}}$.

В цей час з ПЄ титановий розплав поступово стікає в кристалізатор, в результаті чого зменшується амплітуда коливання зливку. В процесі плавлення, настає момент коли при втягнутому положенні гідродвигуна рівень розплаву в кристалізаторі буде $h \geq h_{\text{max}}$, а поточний хід менше мінімального допустимого $s_{\text{min}} \geq s_{\text{пот}}$. Тоді увесь процес повторюється спочатку, до моменту коли буде подана команда оператора про завершення технологічного циклу $S_{\text{оп}} = 1$.

Запропонований контур витягування зливку з кристалізатора забезпечує грубе та точне регулювання рівня титанового розплаву в кристалізаторі та подачу додаткових коливань на нього, тим самим замінюючи силу тертя початку руху на вдвічі меншу силу тертя постійного руху, що виникає у парі тертя зливков-кристалізатор.

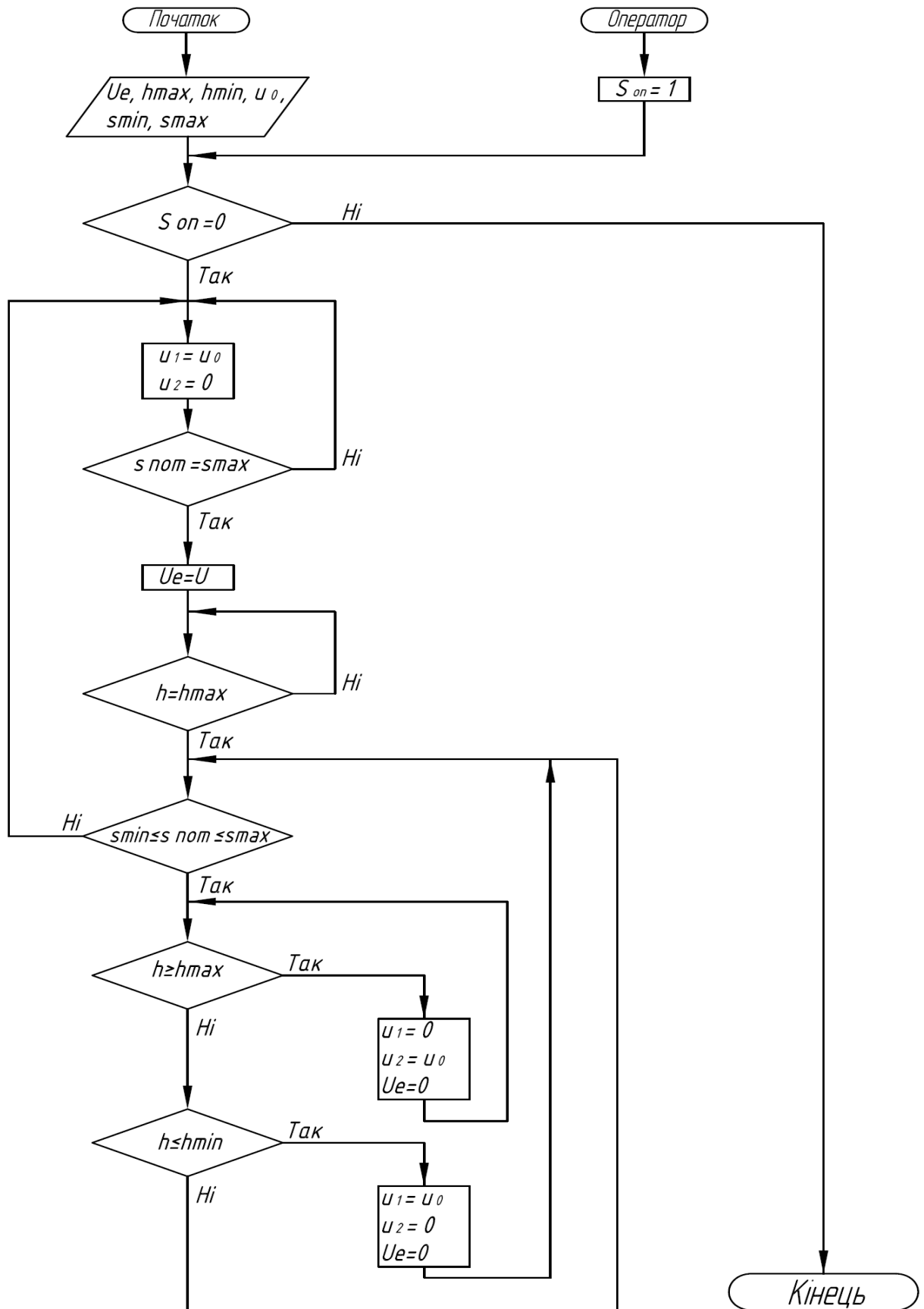


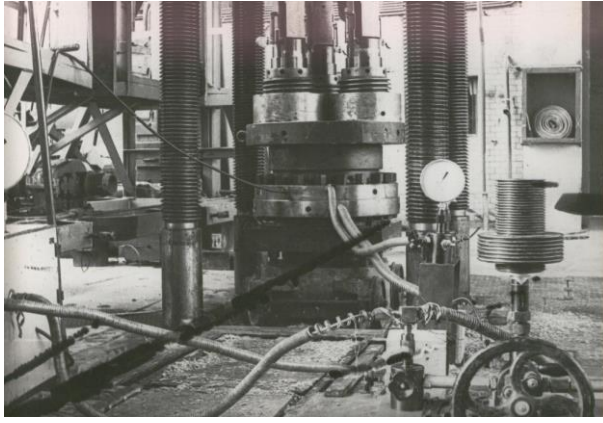
Рис. 4.2. Алгоритм керування контуром витягування зливку з кристалізатора

4.1.3 Використання гідравлічного мембранного виконавчого механізму для подачі коливань на зливки

В якості гідравлічного двигуна для витягування зливку з кристалізатора з подачею на нього додаткових коливань при ЕПП можна використати штоковий гідравлічний циліндр, який безпосередньо передає зусилля на зливки через шток зі з'єднанням «ластівчин хвіст» [3]. Використання такого рішення може забезпечити реалізацію необхідної задачі тільки за умови малих габаритів зливку, оскільки збільшення довжини зливку призводить до подвійного збільшення довжини гідроциліндра у витягнутому положенні, що у свою чергу вимагає додаткового простору для монтажу такого гідроциліндра.

ДНВК «Київським інститутом автоматики» протягом останніх 40 років в якості натискних приводів валків прокатних станів та для вимірювання і підтримання постійної необхідної товщини прокатних листів використовуються гідравлічні мембранні механізми (ГММ) [17, 18] (рис. 4.3), які мають невеликий хід (до 5 мм), в них відсутні витоки, а також завдяки їх використанню разом з пропорційною гідравлікою та промисловим контролером можливе позиціонування жорсткого центру, з'єданого з мембраною з точністю до 0.1 мм, а ресурс спрацювання більше 1 млн. циклів навантаження при робочому тиску до 300 МПа [20, 32, 49]. Такі приводи мають невеликі габарити і можуть бути встановлені на штоку витягування зливку з кристалізатора (рис. 4.3) [36, 98].

Конструктивно ГММ (рис. 4.4) складається з мембрани 1, закріпленої різьбовим з'єднанням між плунжером 2 та втулкою 3. З іншої сторони мембрана закріплюється між корпусом 4 та кришкою 5 болтами 6. Місця контакту мембрана-плунжер та мембрана-корпус для уникнення витоків додатково ущільнюються торцевими ущільненнями 7 та 8 [18]. Місце установки датчика положення ходу центру ГММ зазначене на рис. 4.1 поз. 14 на рис. 4.4. задля спрощення зображення не вказано.



а



б

Рис. 4.3. Випробування ГММ (а) та їх його використання на валку прокатного стану (б)

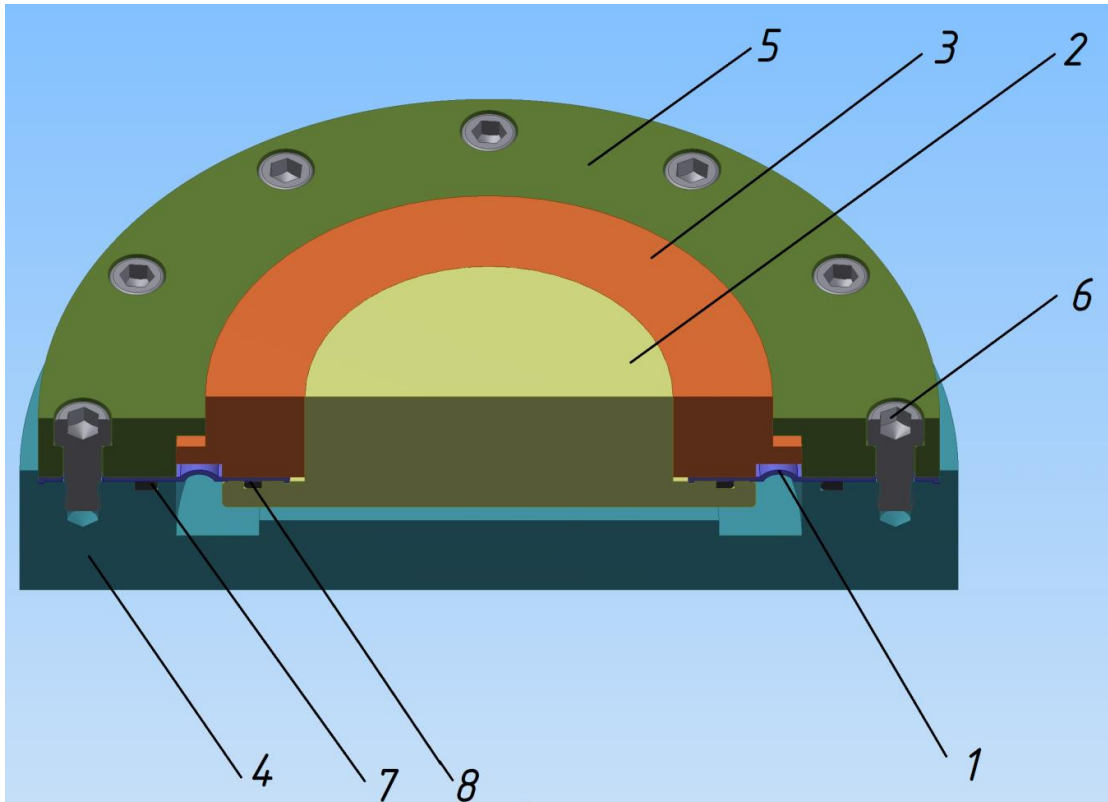


Рис. 4.4. Спрощена конструкція ГММ в розрізі: 1 – мембрана; 2 – плунжер; 3 – втулка; 4 – корпус; 5 – кришка; 6 – болти; 7,8 – ущільнення

Незважаючи на свої переваги ГММ має один суттєвий недолік – можливість передачі зусилля тільки в одному напрямку. Але у випадку приводу

для подачі коливань необхідно подавати коливання з зусиллям в двох напрямках, оскільки сили тертя зливку по кристалізатору більше за вагу зливка [42].

Для забезпечення подачі додаткових коливань на зливков при зворотно-поступальному русі, долаючи навантаження в обох напрямках було використовувати гідравлічний мембранний виконавчий механізм двосторонньої дії (рис. 4.5) [74, 104], який складається з ГММ 1 (з однофрровою мембраною) та ГММ з отвором 2 (з двофрровою мембраною), між якими затиснутий фланець 3 накручений на шток 4, що передає зусилля безпосередньо на зливков в кристалізаторі. ГММ 1 закріплюється на нижній плиті 5, ГММ з отвором 2 закріплюється на верхній плиті 6. Нижня плита 5 та верхня плита 6 з'єднуються між собою швелерами 7, утворюючи жорстку конструкцію. Нижня плита 5 закріплюється на штоку 8, який з'єднаний з барабаном 10 з гвинтами 9.

В початковий момент фланець 3 зі штоком 4 опирається на поверхню ГММ 1, а між поверхнею ГММ з отвором 2 і фланцем 3 існує зазор, який повинен бути меншим за робочі ходи ГММ 1 та ГММ з отвором 2.

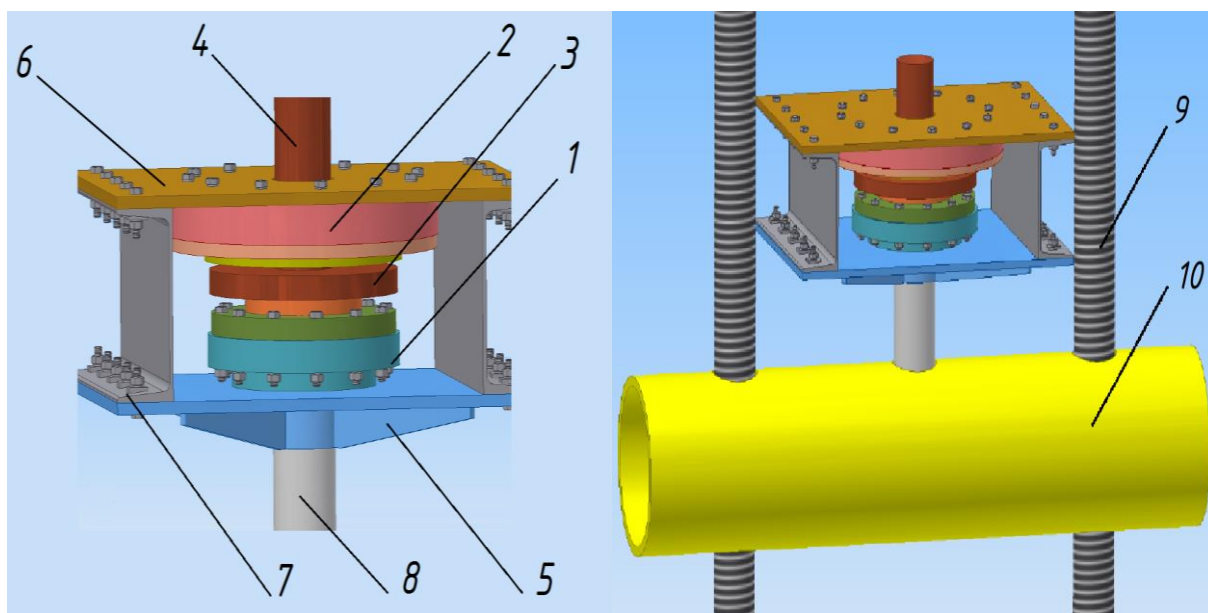


Рис. 4.5. Конструкція ГМВМ: 1 – гідравлічний мембранний механізм; 2 – гідравлічний виконавчий механізм з отвором; 3 – фланець; 4 – шток зливку; 5 – нижня плита; 6 – плита верхня; 7 – швелер; 8 – шток барабана; 9 – гвинтова передача; 10 – барабан

ГММ з отвором (рис. 4.6) складається з корпусу 1, ободу 2 та кришки 3, які кріпляться до корпусу 1, затискаючи мембрану з двома гофрами 4 болтами 5 та 6. На мембрані з двома гофрами 4 між корпусом 1 та ободом 2 з кришкою 3 закріплюється кільце 7 з плунжером 8 гвинтами 9. Місця контакту мембрана-плунжер та мембрана-корпус для уникнення витоків робочої рідини додатково ущільнюються торцевими ущільненнями 10, 11, 12, 13.

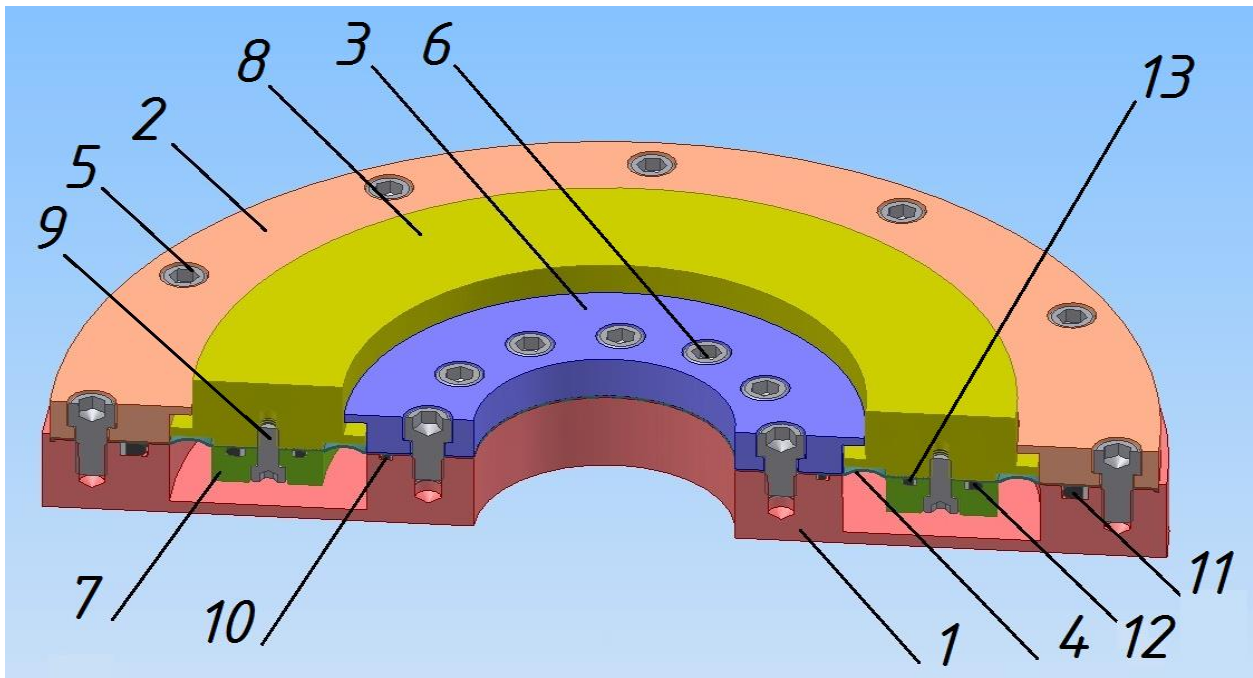


Рис. 4.6. Спрощена конструкція ГММ з отвором в розрізі: 1 – корпус; 2 – обод; 3 – кришка; 4 – мембрана з двома гофрами; 5,6 – болти кріплення мембрани; 7 – кільце; 8 – плунжер; 9 – болти кріплення ободу; 10, 11, 12, 13 – ущільнення

4.2. Розрахунок мембрани гідравлічного мембранного виконавчого механізму

4.2.1. Математична модель напружено-деформованого стану мембрани гідравлічного мембранного виконавчого механізму

Для мембранних механізмів найбільш схильною до руйнування деталлю є мембрана, оскільки вона забезпечує робочий хід жорсткого центру ГМВМ і

усуває перекося від навантаження, а також постійно перебуває в деформованому стані та під тиском робочої рідини гідроприводу. Тому ресурс роботи ГМВМ визначається ресурсом роботи саме мембрани [96]. І для правильного проектування ГМВМ необхідно досліджувати НДС мембрани.

Опис НДС мембрани ГМВМ виконується в циліндричних координатах. Враховуючи, що задача осесиметрична, то її можна звести з об'ємної до плоскої (рис. 4.7).

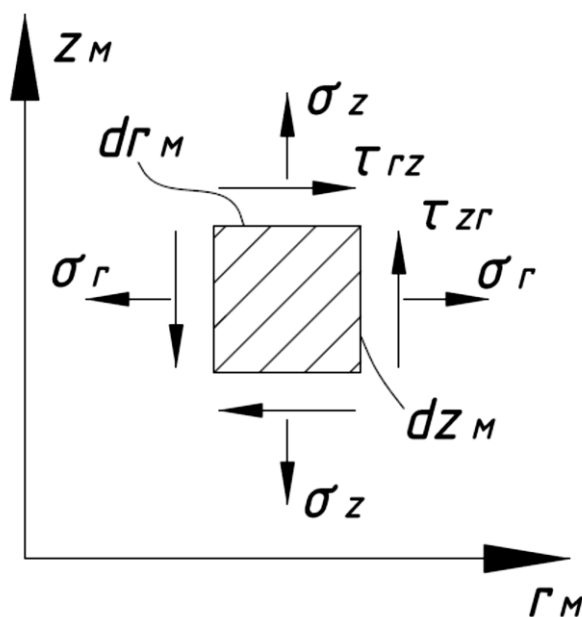


Рис 4.7. Напруження в мембрані ГМВМ

Координатам r_M , φ_M , z_M відповідають переміщення u_M , v_M , w_M . Приймається, що у зв'язку з симетричністю мембрани кутова деформація відсутня $v_M = 0$; деформації u_M та w_M не залежать від v_M ; дотичні напруження $\tau_{r_M\varphi_M}$ та $\tau_{\varphi_M z_M}$ відсутні. Тоді відносні лінійні та кутові деформації визначаються відповідно [92]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{r_M} &= \frac{\partial u_M}{\partial r_M}; \quad \varepsilon_{\varphi_M} = \frac{u_M}{r_M}; \quad \varepsilon_{z_M} = \frac{\partial w_M}{\partial z_M}; \\ \gamma_{r_M\varphi_M} &= 0; \quad \gamma_{\varphi_M z_M} = 0; \quad \gamma_{z_M r_M} = \frac{\partial u_M}{\partial r_M} + \frac{\partial w_M}{\partial z_M}. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Закон Гука для мембрани ГМВМ в циліндричних координатах має вигляд:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{r_M} &= \frac{1}{E_M} (\sigma_{r_M} - \nu(\sigma_{\varphi_M} + \sigma_{z_M})); \\
\varepsilon_{\varphi_M} &= \frac{1}{E_M} (\sigma_{\varphi_M} - \nu(\sigma_{r_M} + \sigma_{z_M})); \\
\varepsilon_{z_M} &= \frac{1}{E_M} (\sigma_{z_M} - \nu(\sigma_{r_M} + \sigma_{\varphi_M})); \\
\tau_{r_M\varphi_M} &= 0; \\
\tau_{\varphi_M z_M} &= 0; \\
\gamma_{r_M} &= \frac{\tau_{z_M r_M}}{G_M},
\end{aligned} \tag{4.2}$$

де E_M – модуль пружності Юнга мембрани; σ_{r_M} – головне напруження вздовж осі r_M ; ν – коефіцієнт Пуассона; σ_{φ_M} – головне напруження вздовж осі φ_M ; σ_{z_M} – головне напруження вздовж осі z_M ; G_M – модуль пружності мембрани другого роду; $\tau_{z_M r_M}$ – дотичне напруження відносно осей z_M та r_M .

Рівняння рівноваги в переміщеннях для мембрани ГМВМ при відсутності масових сил мають вигляд:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{r_M} \frac{\partial \sigma_{\varphi_M}}{\partial \varphi_M} &= 0; \\
\frac{\partial \sigma_{r_M}}{\partial r_M} + \frac{\sigma_{r_M} - \sigma_{\varphi_M}}{r_M} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z_M} &= 0; \\
\frac{\partial \sigma_{z_M}}{\partial z_M} + \frac{\partial \tau_{r_M z_M}}{\partial r_M} + \frac{\tau_{r_M z_M}}{r_M} &= 0.
\end{aligned} \tag{4.3}$$

Граничні умови описуються наступним чином (рис. 4.8):

- для лінії L1:

$$u_M = 0; v_M = 0; w_M = A_M, \tag{4.4}$$

де A_M – задане переміщення мембрани вздовж осі z_M ;

- для лінії L2:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{r_M} & \tau_{zr} \\ \tau_{zr} & \sigma_{z_M} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin \beta \\ \cos \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \tag{4.5}$$

де β – кут між горизонталлю та фрагментом поверхні;

- для лінії L3:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{r_M} & \tau_{zr} \\ \tau_{zr} & \sigma_{z_M} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin \beta \\ \cos \beta \end{pmatrix} = -p_M \begin{pmatrix} \sin \beta \\ \cos \beta \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

- для лінії L4:

$$u_M = 0; v_M = 0; w_M = 0. \quad (4.7)$$

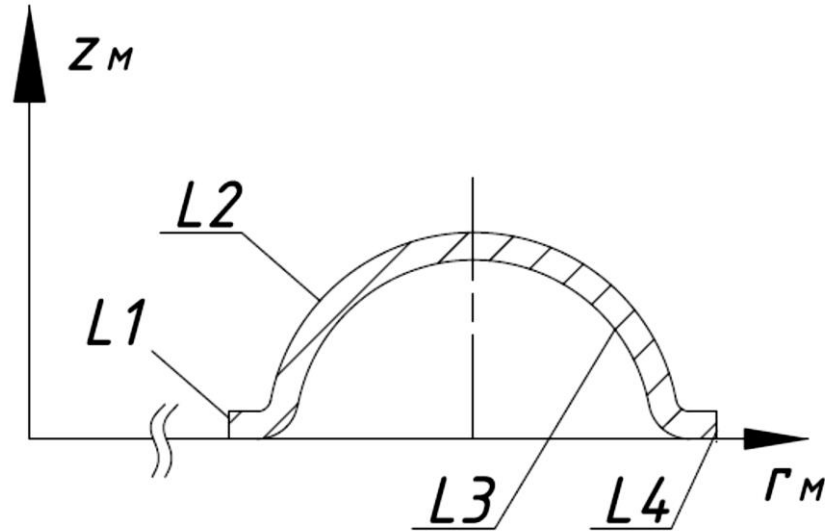


Рис. 4.8. Граничні умови при моделюванні НДС мембрани ГМВМ

В подальшому, використовуючи рівняння 4.1...4.5 та граничні умови 4.6 та 4.7 та чисельні методи, наприклад метод скінченних елементів, за допомогою програмних пакетів Ansys Mechanical APDL чи COMSOL Multiphysics можна дослідити НДС в кожній точці мембрани.

4.2.2. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану мембрани гідравлічного мембранного механізму

Зазвичай мембрана ГМВМ є складальною одиницею і складається з декількох спресованих тонших мембран [21, 23]. Матеріал мембран – аустенітна сталь 12Х18Н10Т ГОСТ 5949-75, яка має високу межу текучості, ударну в’язкість та пластичність у порівнянні з феритними сталями [9]. Підвищена пластичність матеріалу забезпечує високий ресурс роботи ГММ.

Тонкі мембрани можуть виготовлятися трьома способами: штамповка, гідравлічна штамповка та обкатка [19, 22, 50]. Після цього мембрани складаються в пакет і обов'язково піддаються «тренуванню» в зібраному ГММ під тиском [17, 18].

Важливою задачею є коректний розрахунок мембрани на втомну міцність при русі ГМВМ за заданим законом з частотою 0.5 Гц під тиском робочою рідини $p_m = 2$ МПа [96] і робочим ходом 2 мм.

В роботі [28] проводилися дослідження матеріалу мембрани на втомну міцність при симетричному циклі навантаження в умовах чистого згину з отриманням кривих втоми в логарифмічних координатах для різних відносних деформацій (рис. 4.9). Як зазначалося раніше, ресурс спрацювання мембрани ГММ – $N = 10^6$ циклів навантаження, при чому відносна деформація приймається $\varepsilon_{\text{доп}} = 2\%$. Для заданих значень межа витривалості в мембрані складає $\sigma_{-1} = 340$ МПа (див. рис. 4.9).

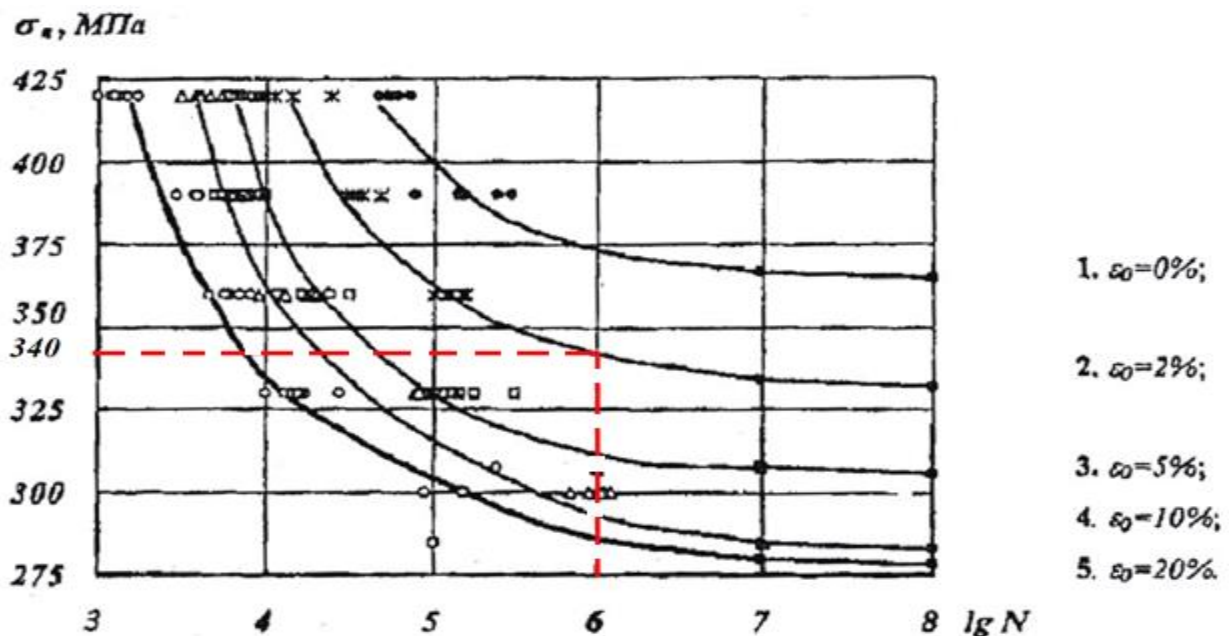


Рис. 4.9 Криві втоми матеріалу мембрани сталь 12X18H10T при циклічному навантаженні [28]

Для розрахунку НДС однофрової мембрани була запропонована система лінійних неоднорідних диференціальних рівнянь [19, 87, 139]. Однак розв'язок

такої системи рівнянь неможливо отримати у вигляді елементарних функцій. Тому проводиться тільки спрощений статичний розрахунок для точки затиснення мембрани між корпусом та кришкою ГМВМ, оскільки приймається, що вона сприймає найвищі напруження.

На сьогодні широке розповсюдження отримали розрахунки на міцність конструкцій з використанням чисельних методів та CAE програм, зокрема універсальні програмні системи скінченно-елементного аналізу Ansys Mechanical APDL та COMSOL Multiphysics [16, 24]. Такі програмні системи забезпечують необхідну точність розрахунків в кожній точці досліджуваної одно- та багатогрвової мембрани [63, 82, 83], а також дають можливість проведення циклу випробувань об'єктів моделювання зі зміною вхідних геометричних та силових параметрів.

На початку, з метою відпрацювання граничних умов закріплення та навантаження, проведено аналіз результатів чисельних експериментів розрахунку НДС з використанням CAE Ansys Mechanical APDL та COMSOL Multiphysics представлено на рис. 4.10. Результати тестових розрахунків НДС показали задовільне відхилення по максимальному напруженню (до 2.5%) для моделювання деформацій та напруження в найбільш небезпечному перерізі мембрани (затиснення мембрани між кришкою та корпусом, місця згину гофра).

Розрахунок на міцність проводився вирішенням плоскої симетричної задачі. До геометричних параметрів мембрани ГММ, які впливають на НДС, належать (рис. 4.11) [40, 41]:

- R – радіус дуги гофри мембрани;
- r_{cm} – радіус спряження дуги мембрани з площиною мембрани;
- s_m – товщина мембрани;
- D_m – відстань від осі мембрани до центра дуги мембрани;
- A_m – амплітуда коливання мембрани, при чисельному розрахунку приймається $A_m = 0.001$ м.

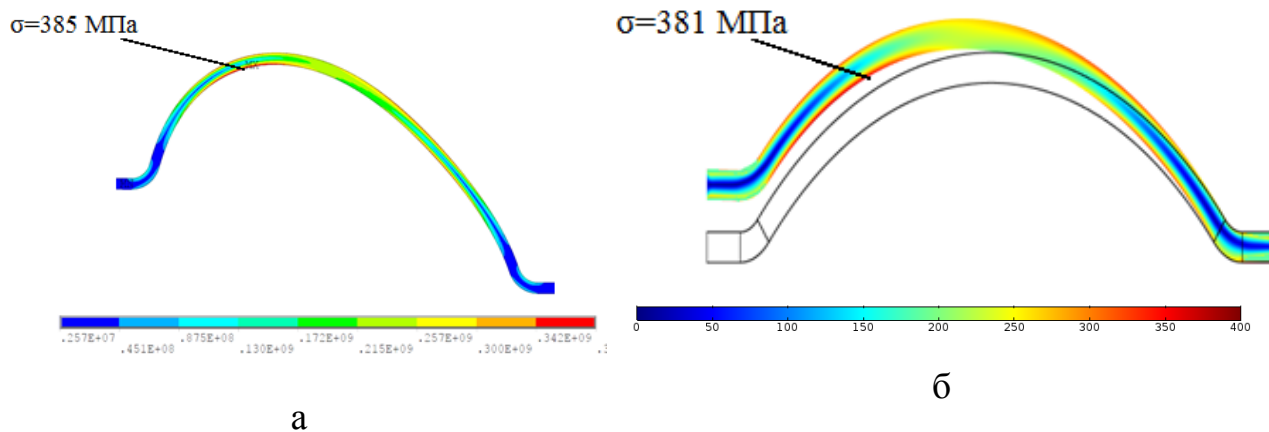


Рис. 4.10. Порівняння НДС мембрани отриманого САЕ-системами: а – Ansys Mechanical APDL; б – COMSOL Multiphysics

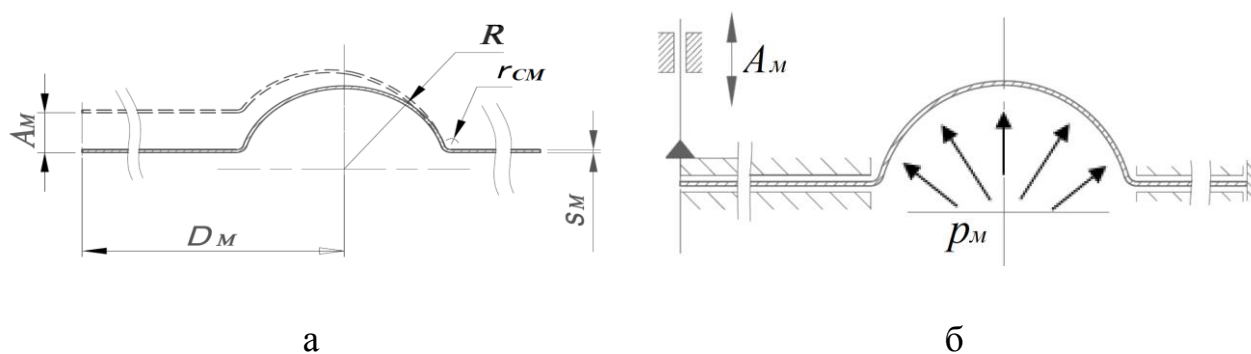


Рис. 4.11 Принципова схема роботи мембрани: а – геометрична схема; б – кінематична схема

Кінематика руху мембрани наступна (рис. 4.11б): периферія нерухомо закріплена між корпусом та кришкою, а центральна частина закріплена між жорстким центром та плунжером і може переміщуватися тільки в вертикальному напрямку.

При чисельному розрахунку мембрани приймалися наступні припущення:
 - деформація в мембрані відбувається згідно кінематичної схеми (рис. 4.11б);

- кожна з чотирьох мембран пакету сприймає $\frac{1}{4}$ всього тиску рідини, що діє на них [17];

- напруження мембрани залежить тільки від значення амплітуди і не залежить від її напрямку;

- усі деформації пружні.

4.2.3. Тестове модельне дослідження міцності мембрани гідравлічного мембранного виконавчого механізму

Для початку було проведено моделювання залежності напруження від товщини мембрани при різних тисках та радіусах дуги гофра та спряження дуги з площиною мембрани (рис. 4.12).

Як видно з графіків на рис. 4.12а...в, залежності можна розбити на два інтервали: для першого інтервалу товщин $s_m = 0.0001 \dots 0.0003$ м – зміна тиску суттєво впливає на максимальне напруження в мембрані, а в другому інтервалі $s_m = 0.0003 \dots 0.001$ м – криві практично збігаються. Враховуючі, що практичне значення має другий діапазон (наявність сортаменту відповідної товщини), то для подальших чисельних розрахунків приймається, що тиск несуттєво впливає на максимальне напруження в мембрані і приймається $p_m = 2$ МПа.

Також, в результаті моделювання встановлено, що зміна радіуса спряження дуги з площиною мембрани впливає на максимальне напруження несуттєво і для подальших моделювань приймається, що $r_{cm} = 0.002$ м (рис. 4.13) [103].

В подальшому було проведено моделювання НДС мембрани ГММ (див. Додаток Е) зі зміною:

- товщини мембрани в діапазоні $s_m = 0.0003 \dots 0.001$ м;
- відстані від осі мембрани до центра дуги мембрани в діапазоні $D_m = 0.09 \dots 0.17$ м;
- радіусі дуги гофри мембрани в діапазоні $R = 0.02 \dots 0.04$ м.

Результати моделювання представлені у вигляді графіків залежності максимального напруження σ від радіуса дуги гофри мембрани R при різних значеннях відстані від осі мембрани до центра дуги мембрани D_m для різних товщин мембрани s_m (рис. 4.14...4.15) [96].

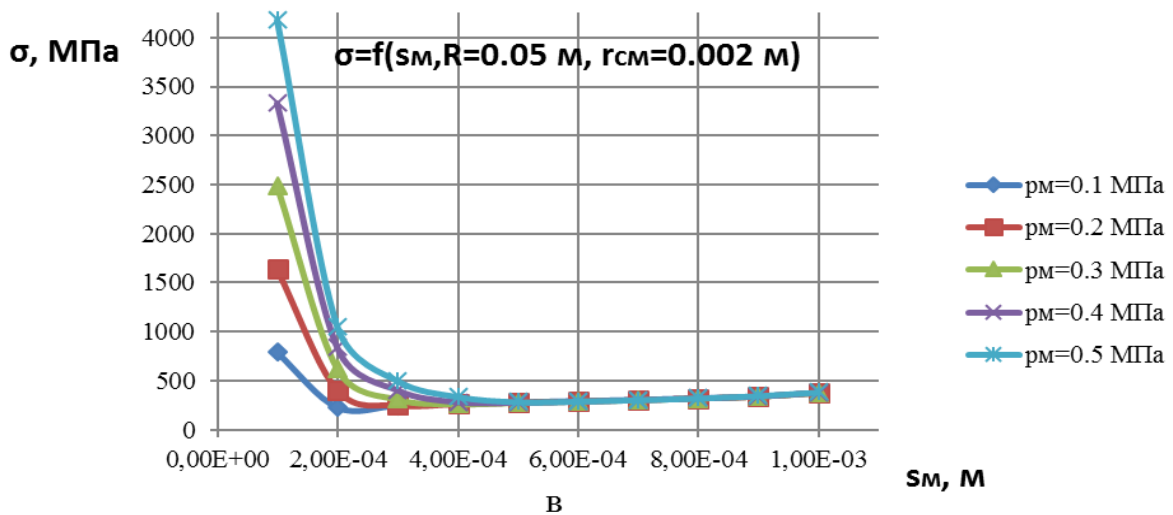
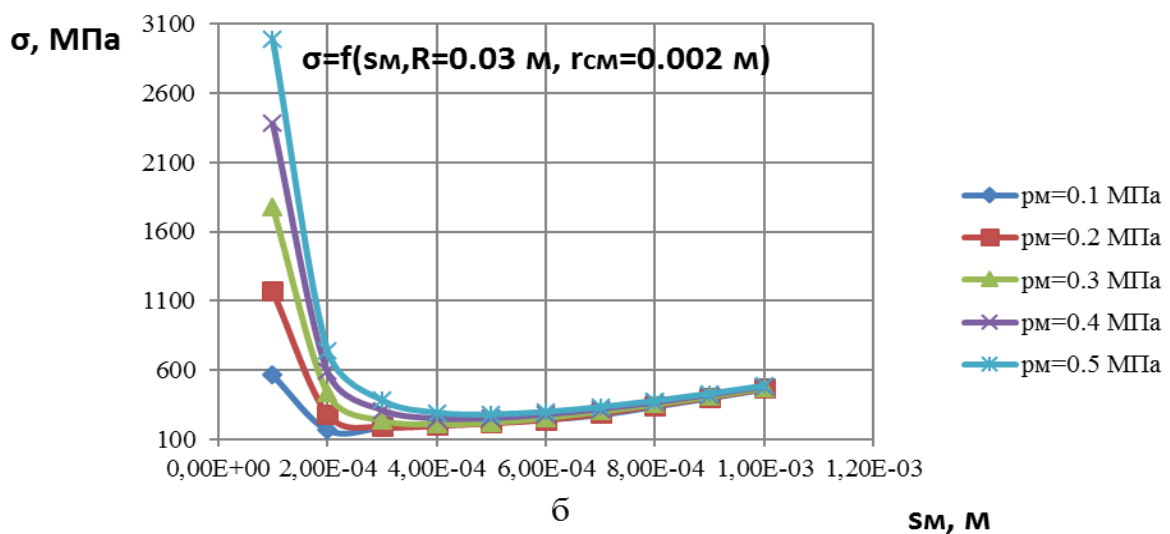
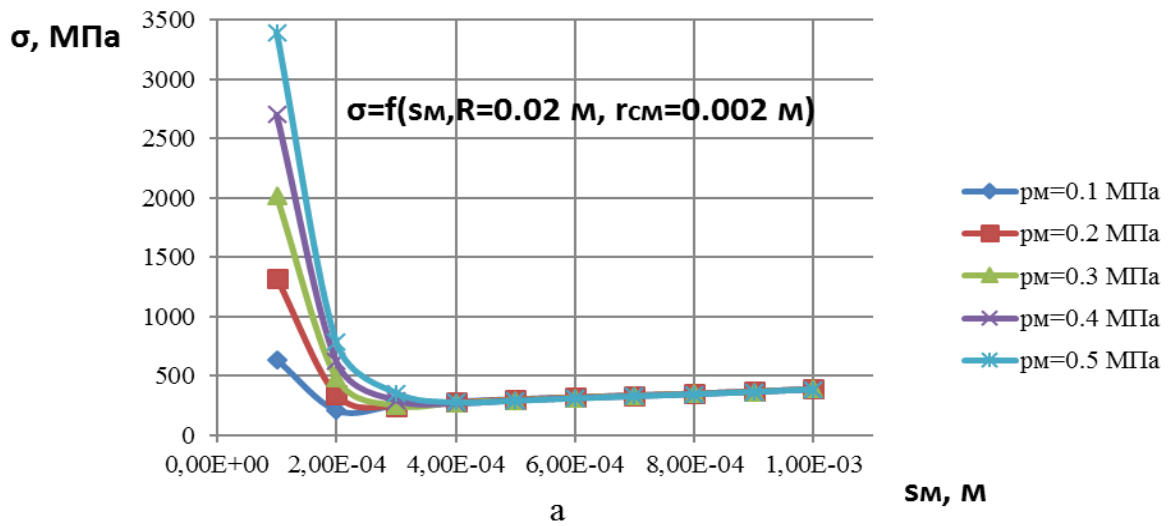


Рис. 4.12. Залежність максимального напруження від товщини мембрани при різних радіусах дуги гофра та радіусах спряження з площиною мембрани

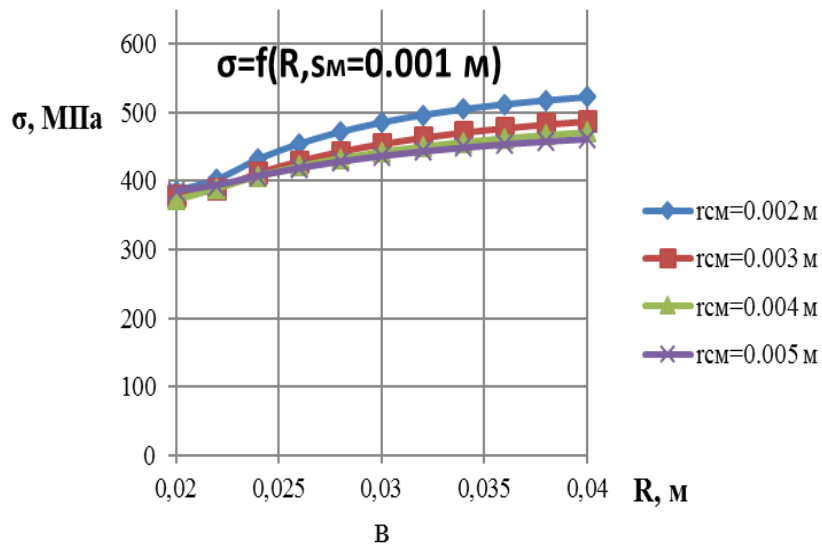
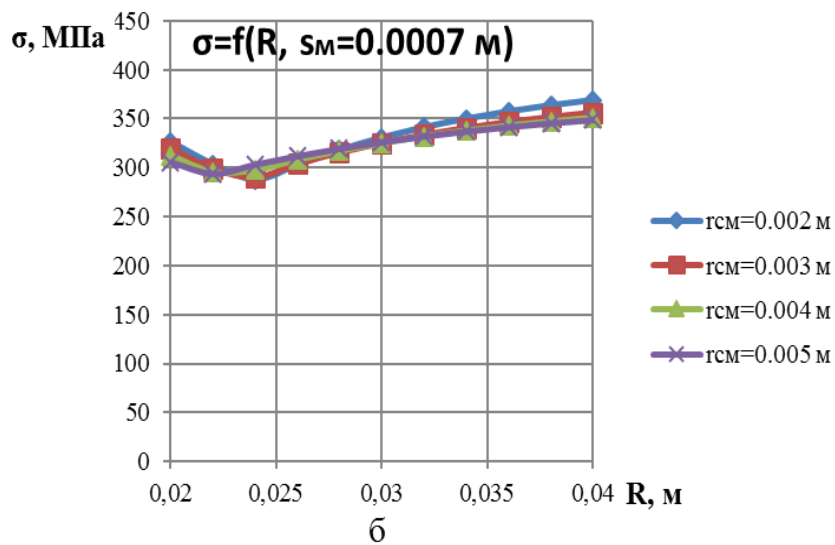
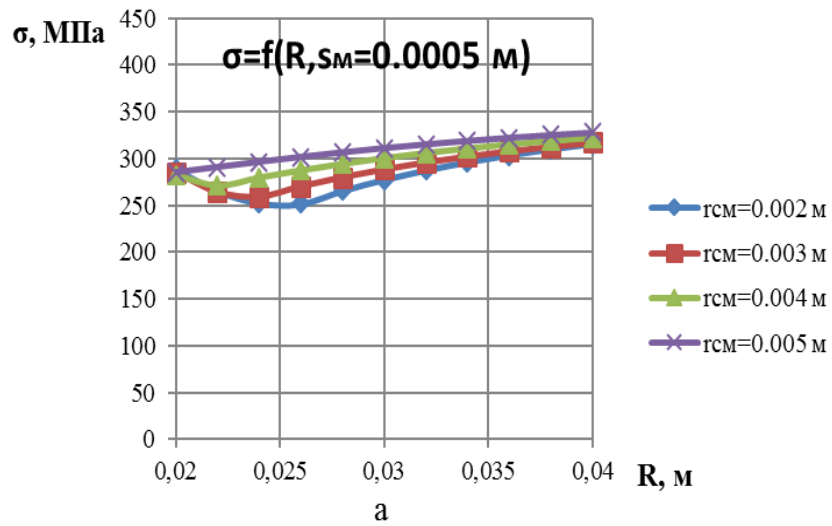


Рис. 4.13. Залежність максимального напруження від радіуса дуги гофра при різних радіусах спряження дуги з площиною мембрани

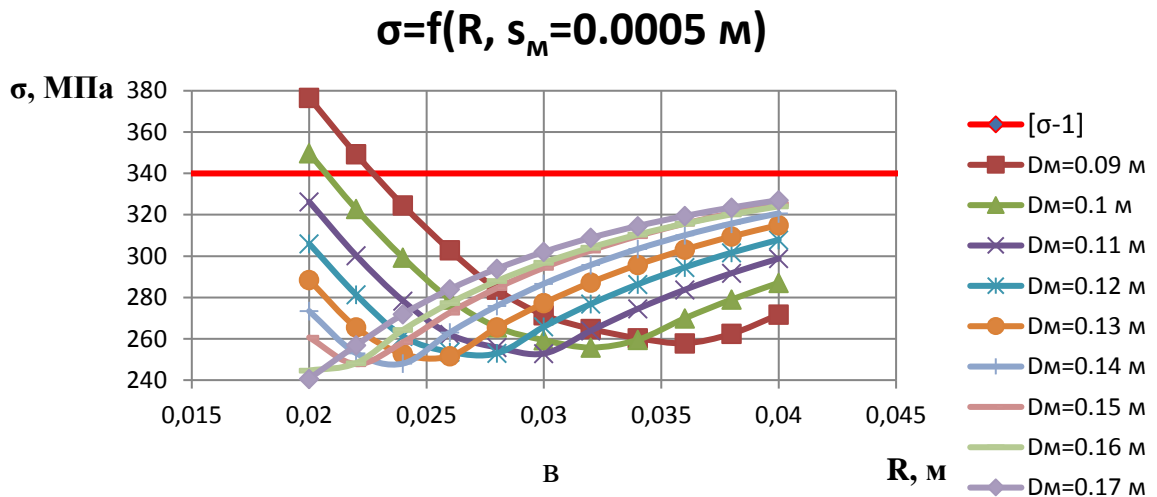
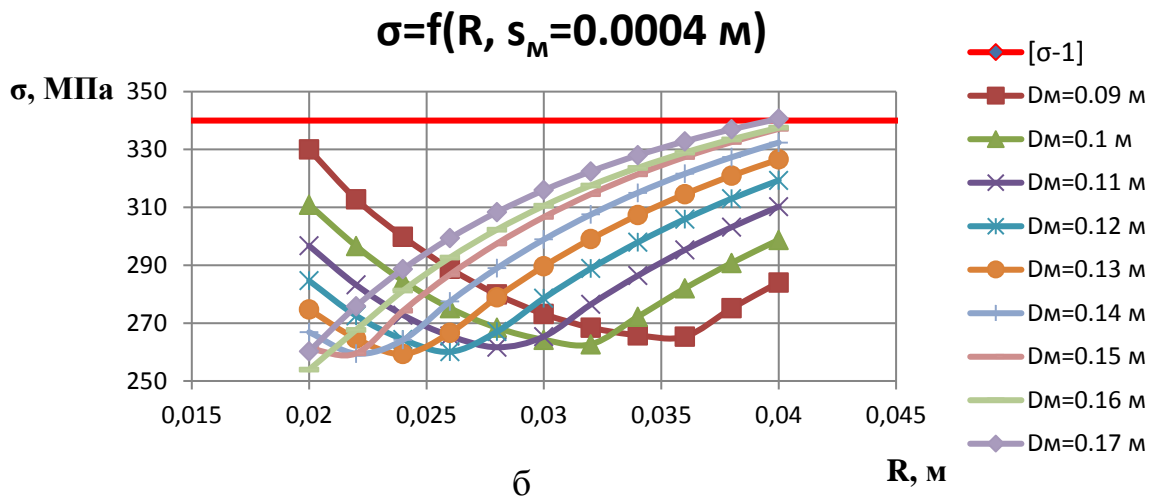
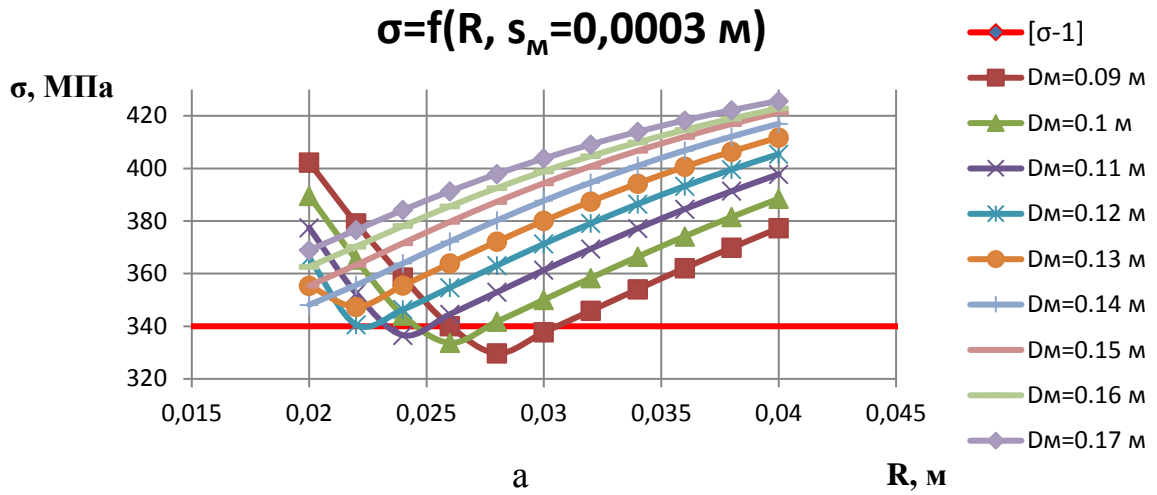


Рис. 4.14. Залежність максимального напруження від радіуса дуги мембрани при різних відстанях між віссю мембрани та центром її дуги і товщиною мембрани в інтервалі $s_m = 0.003 \dots 0.005 \text{ м}$

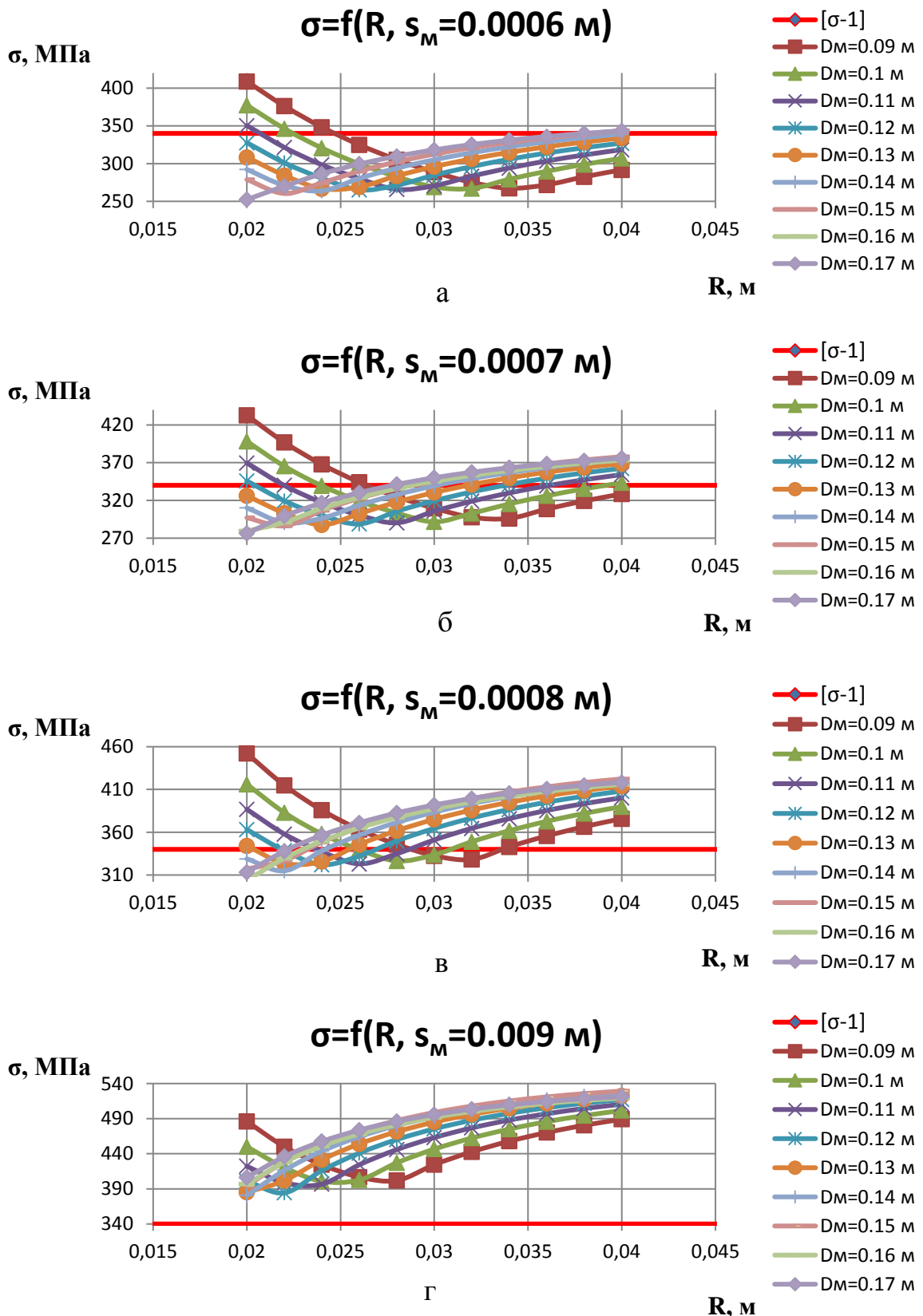


Рис. 4.14. Залежність максимального напруження від радіуса дуги мембрани при різних відстанях між віссю мембрани та центром її дуги і товщиною мембрани в інтервалі $s_m = 0.0006 \dots 0.009 \text{ м}$

На графіках рис. 4.14 та рис. 4.15 прослідковується залежність зменшення максимального напруженні при збільшенні відстані між віссю мембрани та центром дуги мембрани D_M . Також прослідковується мінімум максимального напруження при зміні радіуса дуги мембрани R , при чому точка мінімуму зміщується в сторону з меншим значенням R при збільшенні значення відстані між віссю мембрани та центром дуги мембрани D_M .

4.3. Інженерна методика вибору раціональних геометричних параметрів мембран на основі аналізу напружено-деформованого стану

Проведений аналіз отриманих результатів НДС дозволяє оцінити вплив геометричних параметрів мембрани на її максимальне напруження та отримати аналітичні залежності максимального напруження в мембрані від її геометрії, а також запропонувати інженерну методику вибору раціональних геометричних параметрів мембрани, які задовільняють необхідний ресурс роботи.

Порівнюючи максимальне напруження в мембрані σ з границею втомної міцності σ_{-1} можна побудувати область з діапазоном геометричних параметрів, які задовольняють вимоги по довговічності мембран при амплітуді коливань 1 мм (рис. 4.15).

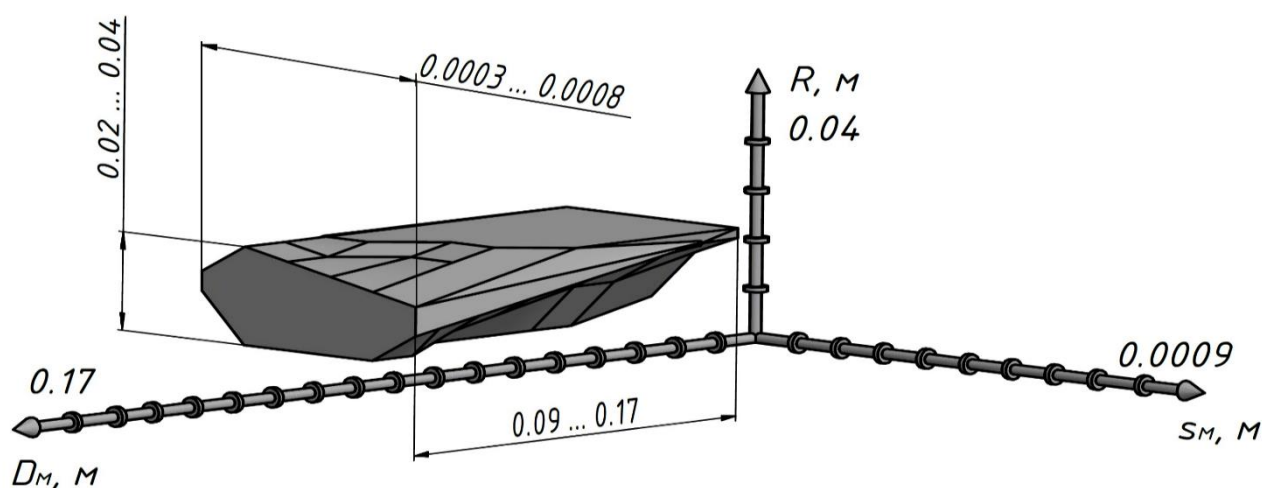


Рис. 4.15. Область допустимих значень геометричних параметрів мембран

Аналіз отриманих залежностей з урахуванням додаткових обмежень за геометрією мембрани (за сортаментом, габаритами та приєднувальними розмірами) дозволив встановити раціональні геометричні параметри мембран для ГМВМ подачі коливань на зливки, які представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Раціональні геометричні параметри мембран

Мембрана	s_m , м	R , м	D_m , м
Одногофрова	0.0005	0.02	0.13
Двогофрова, 1-й гофр	0.0005	0.022	0.1
Двогофрова, 2-й гофр	0.0005	0.02	0.16

При апроксимації допустимих значень геометричних параметрів мембрани був використаний метод найменших квадратів, який є методом знаходження наближеного розв'язку надлишково-визначеної системи [58].

Апроксимаційне рівняння має лінійний вигляд:

$$\sigma = 204 \text{ МПа} - 24589 \frac{\text{МПа}}{\text{м}} \cdot s_m + 2038 \frac{\text{МПа}}{\text{м}} \cdot R + 283 \frac{\text{МПа}}{\text{м}} \cdot D_m \leq \sigma_{-1} \quad (4.8)$$

Області варіації параметрів (згідно з базовими точками) $s_m = 0.3 \dots 0.8$ мм, $R = 20 \dots 40$ мм, $D = 90 \dots 170$ мм. Використовуючи залежність 4.8 і знаючи наявний сортамент матеріалу та габаритні розміри (тобто s_m та D_m), можна визначити необхідний радіус спряження дуги гофра з площиною мембрани R і т.д.

На основі проведеного дослідження, використовуючи запропоновану послідовність дій можна запропонувати інженерну методику вибору раціональних значень геометричних параметрів ГМВМ (рис. 4.16).

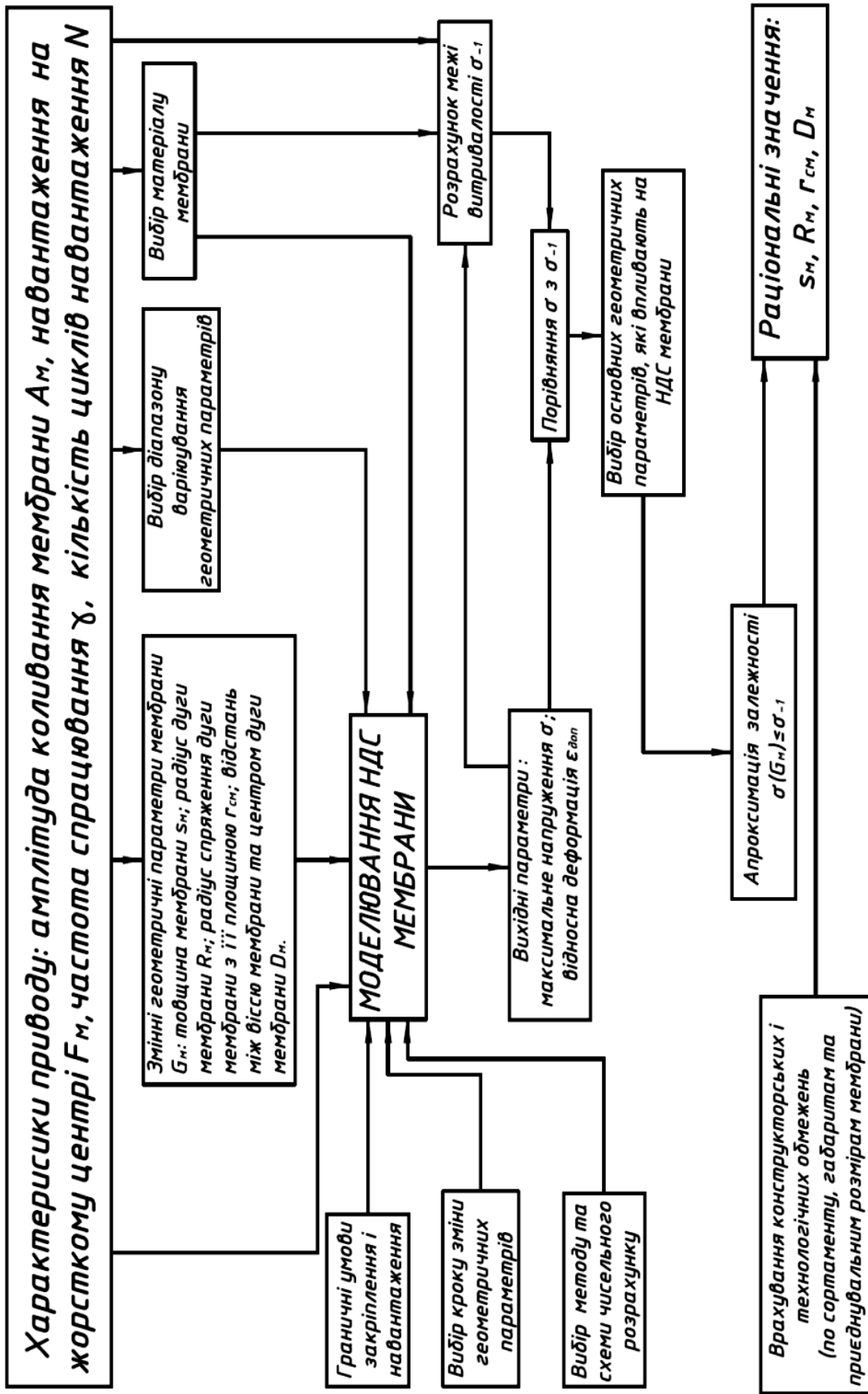


Рис. 4.16. Інженерна методика вибору рациональних значень геометричних параметрів ГМВМ

Згідно запропонованої інженерної методики на першій стадії вибору раціональних значень геометричних параметрів мембрани необхідно визначити умови роботи мембрани, характеристики мембранного механізму, а саме:

- амплітуду коливання A_m жорсткого центру мембранного механізму;
- навантаження, яке повинен долати привод F_m ;
- частоту спрацювань γ ;
- ресурс роботи приводу ГМВМ та кількість коливань мембрани N .

Характеристики ГМВМ визначають вибір типових геометричних параметри мембрани G_m , зміна яких може вплинути на її НДС. Для випадку мембрани ГМВМ такими геометричним параметрами є:

- R – радіус дуги гофри мембрани;
- r_{cm} – радіус спряження дуги мембрани з площиною мембрани;
- s_m – товщина мембрани;
- D_m – відстань від осі мембрани до центра дуги мембрани.

Від характеристик ГМВМ також залежить вибір діапазону зміни геометричних параметрів мембрани, які також залежать від особливостей установки приводу на барабані гвинтової передачі (рис. 4.5 поз. 10) та ін..

При виборі матеріалу мембрани необхідно враховувати його модуль Юнга E_m . Для забезпечення довготривалої роботи мембрани її матеріал повинен бути пластичним, з модулем Юнга менше $1.98 \cdot 10^5$ МПа. При цьому матеріал повинен забезпечувати умову міцності мембрани при дії тиску робочої рідини на неї. До таких матеріалів можна віднести аустенітні сталі з легуючими домішками нікелю та титану [28].

Після вибору фізичних та геометричних параметрів мембрани необхідно задати її розрахункову та кінематичну схему з усіма закріпленнями та обмеженнями степеней свободи певних її зон.

Важливим є вибір кроку зміни геометричних параметрів мембрани для забезпечення необхідної точності розрахунку, оскільки зменшення кроку підвищує точність отриманої в кінці апроксимаційної залежності, але при цьому зростає кількість розрахунків.

В залежності від необхідної точності та швидкості розрахунку вибирається чисельний метод розрахунку, схема чисельного розрахунку, тип елементів, програмний пакет для розрахунку (Ansys, COMSOL Multiphysics, Femap, Nastran, MATLAB і т.д.), кількість ітерацій і т.д.[24, 80].

Після вибору вищевказаних значень проводиться безпосередньо ряд чисельних моделювань зі зміною геометричних параметрів у заданому діапазоні, в результаті якого отримуються вихідні параметри моделювання НДС мембрани.

Необхідними вихідними параметрами моделювання є максимальне напруження σ та максимальна відносна деформація ε_m . Використовуючи криві Веллера для вибраного матеріалу мембрани та вихідні параметри моделювання НДС паралельно з моделюванням НДС мембрани визначається межа витривалості матеріалу σ_{-1} для заданих значень ε_m та N .

Після визначення σ_{-1} , отримане значення порівнюється з максимальними напруженнями для різних геометричних параметрів мембрани σ . Визначаються геометричні параметри, які суттєво впливають на НДС мембрани.

Для комбінацій геометричних параметрів, які задовольняють умову $\sigma \leq \sigma_{-1}$ проводиться апроксимація з використанням відомих методів (метод найменших квадратів, апроксимація сплайнами і т.д.), в результаті якої отримується залежність типу $\sigma(G_m) \leq \sigma_{-1}$, яка описує діапазон геометричних параметрів мембрани, при яких мембрана відпрацює задану кількість циклів навантаження N .

На останньому етапі розрахунку, при виборі раціональних геометричних параметрів мембрани G_m окрім результатів розрахунку на втомну міцність необхідно також враховувати конструктивні та технологічні обмеження, які накладаються на мембрану та мембранний механізм, а саме:

- наявність відповідного сортаменту матеріалу мембрани;
- приєднувальні розміри ГМВМ;
- габаритні розміри ГМВМ.

4.4. Висновки

1. Запропоновано новий спосіб витягування зливку з кристалізатора з подачею додаткових коливань на зливку, який забезпечує за допомогою гвинтової передачі та ГМВМ здійснення грубого та точного регулювання рівня розплаву в кристалізаторі, зменшує вірогідність розриву щойно кристалізованої поверхні та отримання дефектів поверхні на готових зливках, за рахунок заміни сил тертя початку руху на сили тертя постійного руху, що дозволяє прогнозувати зменшення втрати матеріалу при подальшій обробці зливків до 7%.

2. Запропоновано нову конструкцію гідравлічного мембранного виконавчого механізму двосторонньої дії в якості приводу подачі коливань на зливку, яка забезпечує заданий синусоїдальний закон руху зливку.

3. За допомогою чисельних методів в програмному пакеті COMSOL Multiphysics досліджено НДС мембрани ГМВМ. Максимальні значення напружень порівняно з межею витривалості матеріалу мембрани для заданої відносної деформації та ресурсу спрацювань.

4. Використовуючи метод найменших квадратів отримано аналітичну залежність максимального напруження в мембрані від її геометричних параметрів. Відхилення в області допустимих геометричних параметрів не перевищує 10%.

5. На основі розрахунку НДС мембрани запропоновано інженерну методику вибору раціональних геометричних параметрів ГМВМ.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень даного розділу наведено в таких публікаціях:

1. Грабовський Г.Г. Система керування витягуванням титанового зливку з кристалізатора при електронно-променевої плавлі / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Промислова гідравліка та пневматика. – 2013. – № 2 (40). – С.5 – 10.

2. Цибрій Ю.О. Аналіз напружено-деформованого стану мембрани гідравлічного мембранного механізму приводу витягування з зливку

кристалізатора / Ю. О. Цибрій, Г. Г. Грабовський, П. Л. Носко. // Проблеми тертя та зношування. – 2017. – №3. – С. 108 – 114.

3. Патент № 91877 України. МПК В22D 29/00 F16H 43/00. Система витягування зливка з кристалізатора / Грабовський Г.Г., Цибрій Ю.О., Пап П.А., Дереча О.Я.; заявники та правовласники Грабовський Г.Г., Цибрій Ю.О., Пап П.А., Дереча О.Я. – № 201311382, заявл. 26.09.2013, опубл. 25.07.2014, бюл. Бюл.№ 14, 2014 р.

4. Патент № 91889 України. МПК F16H 43/00. Гідравлічний мембранний виконавчий механізм двосторонньої дії / Грабовський Г.Г., Цибрій Ю.О.; заявники та правовласники Грабовський Г.Г., Цибрій Ю.О. – № 2013 13334, заявл. 15.11.2013, опубл. 25.07.2014, бюл. Бюл.№ 14, 2014 р.

5. Грабовський Г.Г. Система витягування зливку з кристалізатору / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XVIII міжнародної науково-технічної конференції. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – С.98 – 99.

6. Цибрій Ю.О. Використання гідравлічних мембранних виконавчих механізмів при витягуванні злиwkів з кристалізатора плавильної печі / Ю.О. Цибрій, Г.Г. Грабовський // Гідро- та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування. Міжнародна науково-технічна інтернет-конференція. Збірник тез доповідей. – Вінниця, 2014. – С. 58 – 59.

7. Грабовський Г.Г. Механізм витягування зливку з кристалізатора / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Промислова гідравліка і пневматика. Матеріали конференції. – Мелітополь: Таврійський державний аграрно-технічний університет, 2014. – С.62.

8. Грабовський Г.Г. Розрахунок на міцність мембрани гідравлічного мембранного механізму / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XXI міжнародної науково-технічної конференції. – К., 2016. – С.155–157.

9. Грабовський Г.Г. Розрахунок мембрани гідравлічного мембранного механізму на втомну міцність / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // XVII міжнародної науково-технічної конференції АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика». Матеріали конференції. – Харків: Український державний університет залізничного транспорту, 2016. – С.125 – 126.

РОЗДІЛ 5

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕХАНОТРОННОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВИПЛАВКОЮ ТИТАНУ ЗІ ЗВОРОТНІМ ЗВ'ЯЗКОМ ПО ТЕМПЕРАТУРІ РОЗПЛАВУ В ПРОМІЖНІЙ ЄМНОСТІ ТА ПО РІВНЮ РОЗПЛАВУ В КРИСТАЛІЗАТОРІ

Досліджена робота розробленої механотронної системи керування виплавною титану зі зворотними зв'язками по температурі розплаву в ПЄ та рівню розплаву в кристалізаторі, яка забезпечує додатково керування механізмом подачі шихти в зону плавки.

5.1. Математичне моделювання роботи механотронної системи керування виплавною титану

5.1.1. Функціональна схема механотронної системи керування виплавною титану

Для отримання необхідного хімічного складу сплавів на основі титану легованих алюмінієм важливою задачею є витримка розплаву в необхідному температурному діапазоні протягом певного часу, оскільки у випадку повільної подачі шихти в зону плавки з розплаву випарується більше алюмінію [14, 15]. Існують відомі рекомендації щодо швидкості витягування зливку з кристалізатора та залежності між потужністю обігріву, масовою подачею шихти в зону плавки та вмістом алюмінію в сплаві, які можна використати для забезпечення необхідних вимог [109].

Контроль швидкості подачі шихти в зону плавки може забезпечити розроблена механотронна система керування виплавною титану при ЕПП (рис. 5.1), яка складається з контуру керування подачею шихти в зону плавки I, контуру керування траєкторією руху електронного променя в ПЄ II та контуру витягування зливку з кристалізатора III [100].

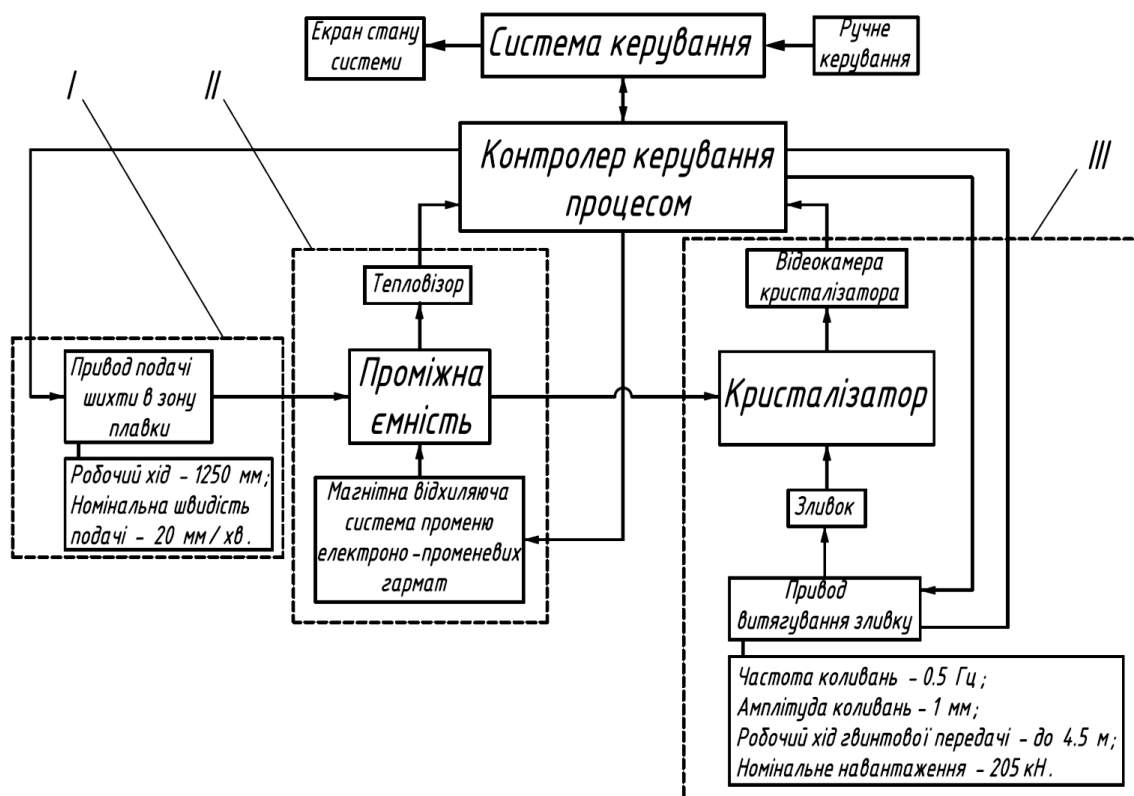


Рис. 5.1. Схема механотронної системи керування ЕПП

Запропонована механотронна система отримує сигнали про тепловий стан розплаву в ПЄ та поточний рівень розплаву в кристалізаторі через тепловізор та камеру рівня відповідно. На основі отриманих даних система визначає швидкість зміни рівня розплаву в кристалізаторі і масову витрату розплаву через зливний носок в кристалізатор за середньої температури розплаву. З використанням існуючих залежностей подаються керуючі сигнали на блок керування ЕПП, блок керування витягуванням.

Розроблена механотронна система включає наступні функції керування:

- траєкторією руху електронного променя з метою покращеного обігріву нерозплавленої шихти та розплаву в ПЄ;
- режимом розподілу потужності по поверхні розплавленого металу у залежності з завданням системи на основі теплового аналізу поверхні ПЄ для отримання необхідної температури розплаву;
- механізмом подачі шихти в зону плавки ПЄ;

- механізмом витягування зливка з кристалізатора з виконанням точного і грубого регулюванні та додаткової подачі на нього коливань.

Практичне значення при ЕПП титанових сплавів має наступне завдання: дотримання технологічного режиму і параметрів, щоб хімічний склад виплавленого зливку відповідав заданим вимогам. Оскільки найбільші обсяги переплавки методом ЕПП титанових сплавів становить Ti-6Al-4V [118, 131], авторами [109] були отримані залежності зміни вмісту алюмінію в зливку сплаву ВТ6 від швидкості плавки і потужності електронно-променевого нагрівання у ПЄ (рис. 5.2). Дана залежність може бути використана в алгоритмі механотронної системи керування виплавною титану при ЕПП.

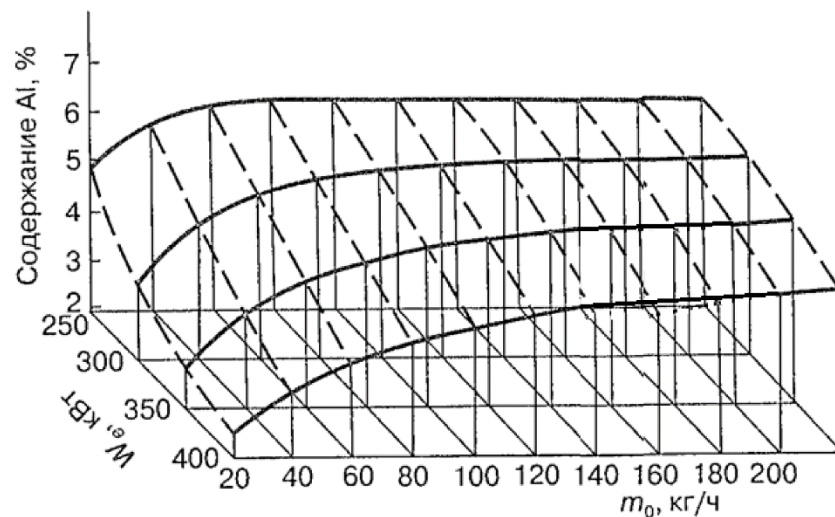


Рис. 5.2. Залежність вмісту алюмінію в зливку сплаву Ti-6Al-4V від швидкості плавки і потужності електронно-променевого нагрівання у ПЄ при 7% вмісті алюмінію в шихті [109]

Відомо, що швидкість плавки вибирається, виходячи з вимог до якості поверхні, мінімізації собівартості виробництва зливків і технічних можливостей ЕПУ. З точки зору продуктивності устаткування швидкість плавки повинна бути максимальною можливою. Але згідно з результатами експериментальних досліджень [62] для прохідного мідного кристалізатора при ЕПП оптимальною є швидкість витягування зливка з кристалізатора $v_{кр} = 8...12$ мм/хв., оскільки

збільшення вище вказаних значень швидкості витягування призводить до порушення суцільності поверхні зливка у вигляді поверхневих розривів.

Так, для ЕПУ типу ВМО з ЕПГ КВ 300 з потужністю 300 кВт, враховуючи їх кількість на плавку $k_{\text{ЕПГ}} = 4$ для зливку з поперечним перерізом зливку $a_{\text{зл}} \times b_{\text{зл}} = 0.22 \times 1.3$ м при густині титана $\rho = 4500$ кг/м³ масова витрата становитиме:

$$Q_{\text{м}} = \frac{60ab\rho_T v_{\text{кр}}}{k_{\text{ЕПГ}}} = \frac{0.22 \cdot 1.3 \cdot 4500 \cdot (8 \dots 12) \cdot 10^{-3}}{4} = 154 \dots 232 \text{ кг/год.} \quad (5.1)$$

Отриманий діапазон значень масової витрати розплаву згідно залежності на рис. 5.2 забезпечить необхідний вміст алюмінію в сплаві.

5.1.2. Моделювання роботи механотронної системи керування виплавою титану

Математичне моделювання роботи механотронної системи керування виплавою титану при ЕПП проводилося на основі раніше розробленої математичної моделі тепло-масообміну в ПЄ (див. розд. 2, додаток Є) та алгоритму керування траєкторією руху електронного променя (див. розд. 3) наступним чином (рис. 5.3):

- вся ПЄ розбивалась на чотири прямокутні зони дії ЕПГ;
- розплав рухається до центру в зонах біля стінок ПЄ і до центру та до зливного носка в центральній зоні із заданими швидкостями;
- від стінок ПЄ до центру подається нерозплавлена шихта із заданою швидкістю;
- кожна ЕПГ обігріває свою зону і при необхідності зону досяжності сусідньої ЕПГ;
- при моделюванні течії розплавленого титану в нижній зоні періодично рахується кількість вузлів, що пройшли нижню межу досліджуваного об'єму і таким чином визначається масова витрата розплаву, що поступає в кристалізатор;

- згідно залежності між масовою витратою та вмістом алюмінію в розплаві та на основі залежності, яка пов'язує масову витрату розплаву зі швидкістю подачі шихти в зону плавки подається умовний сигнал на привід подачі шихти;
- у випадковому порядку з інтервалом 5-10 секунд програма моделює стохастичне потрапляння у випадкову частину ПЄ нерозплавленого шматка шихти (з температурою 300 К) з випадковими за технологією розмірами в заданому діапазоні ($0.035 \text{ м} \leq a_{\text{ш}} \leq 0.055 \text{ м}$, $0.035 \text{ м} \leq b_{\text{ш}} \leq 0.055 \text{ м}$, $0.01 \text{ м} \leq c_{\text{ш}} \leq 0.025 \text{ м}$) (діапазон періодичності потрапляння шихти в ПЄ та діапазон їх розмірів вибранні на основі спостережень за реальними плавками на установках типу ТІСО-15М та ВМО).

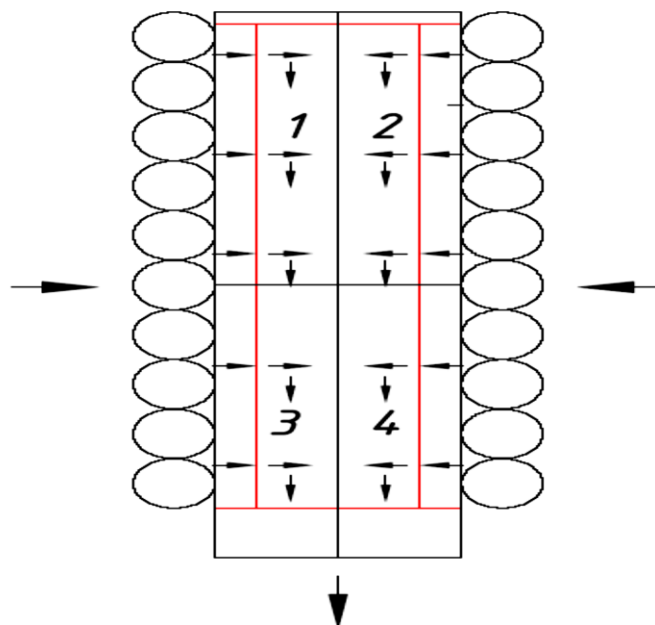


Рис. 5.3. Принципова схема моделювання роботи механотронної системи керування

5.2. Аналіз результатів моделювання роботи механотронної системи керування виплавкою титану

Було проведено моделювання роботи механотронної системи керування виплавкою титану з урахуванням заданих умов в п. 5.1.2 з часом роботи системи 120 с. На рис. 5.4 представлені температурні поля на поверхні розплаву та на висоті 15 мм в момент $t_{\text{м}} = 120 \text{ с}$.

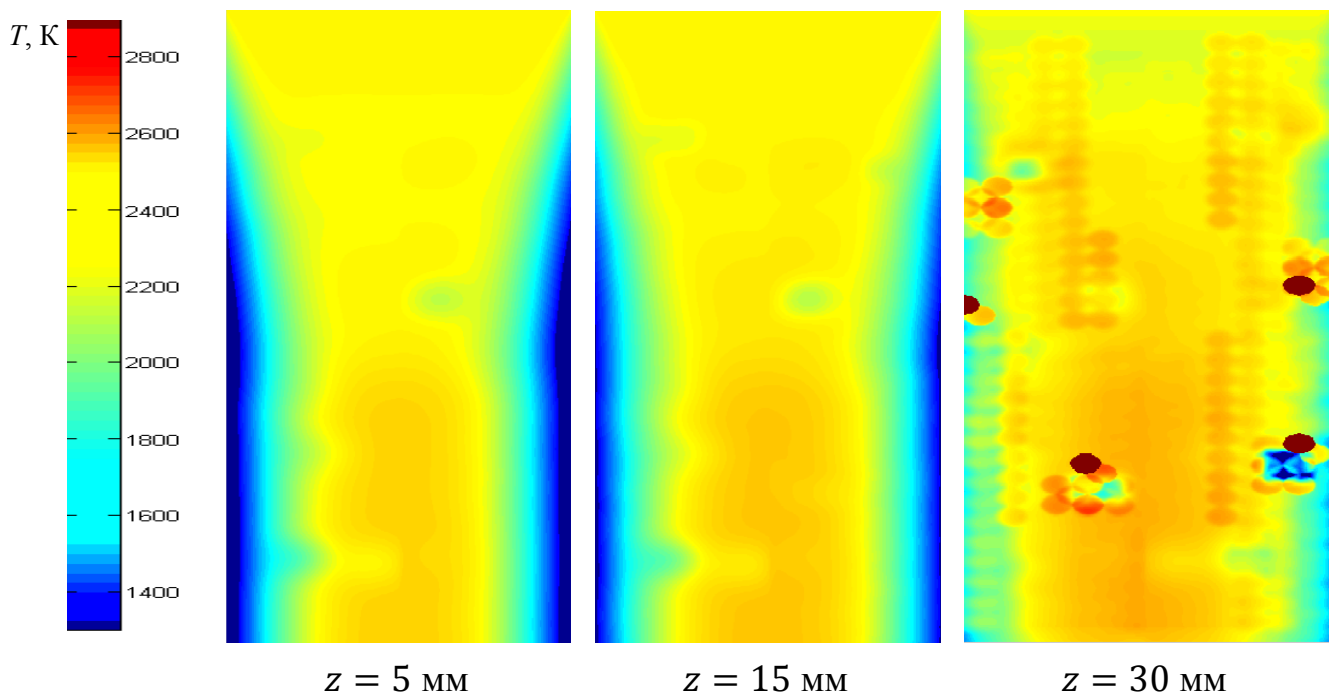
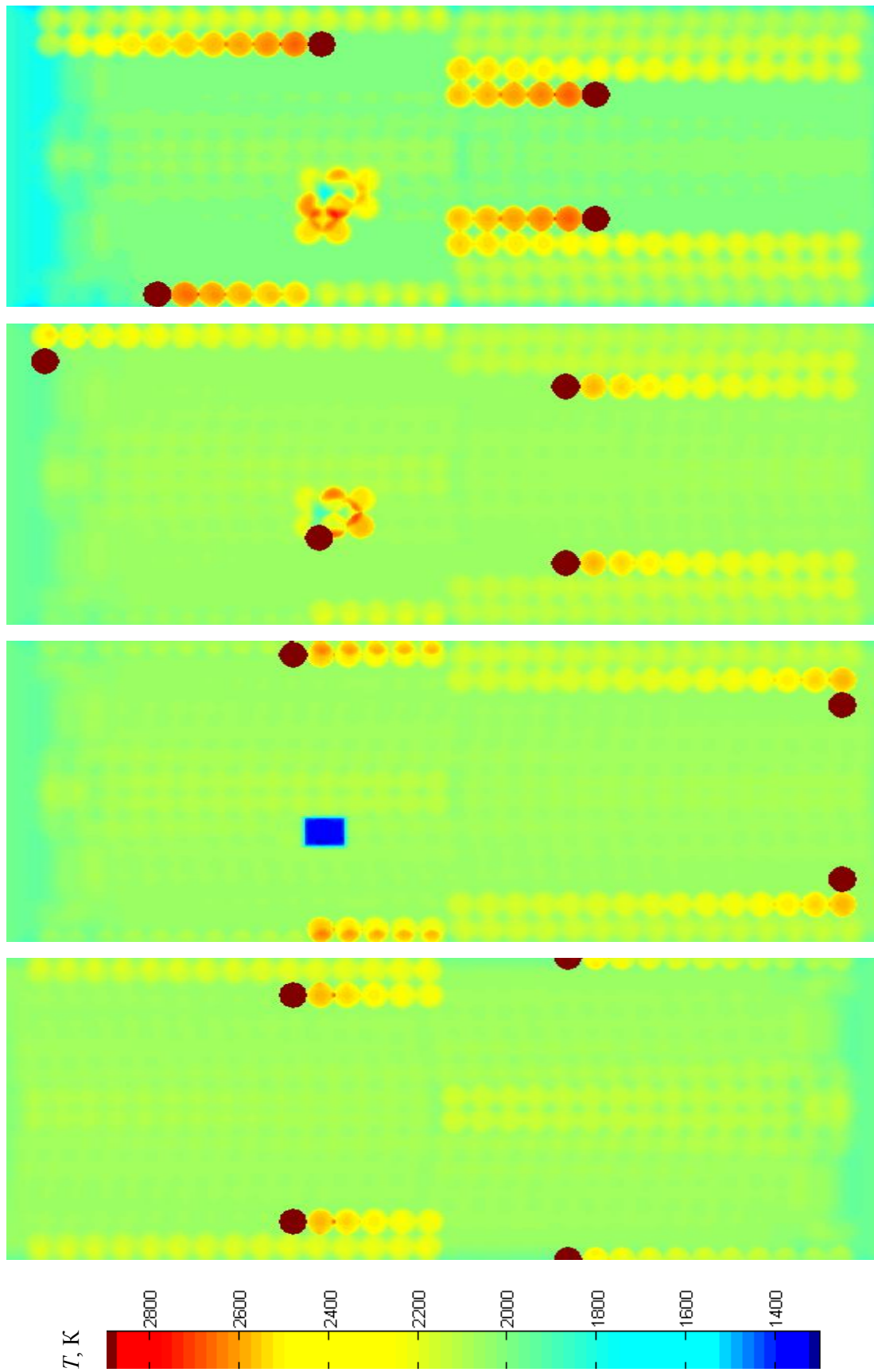


Рис. 5.4. Температурні поля ПЄ ВМО при моделюванні роботи розробленої механотронної системи керування виплавою титану

З отриманих температурних полів видно, що:

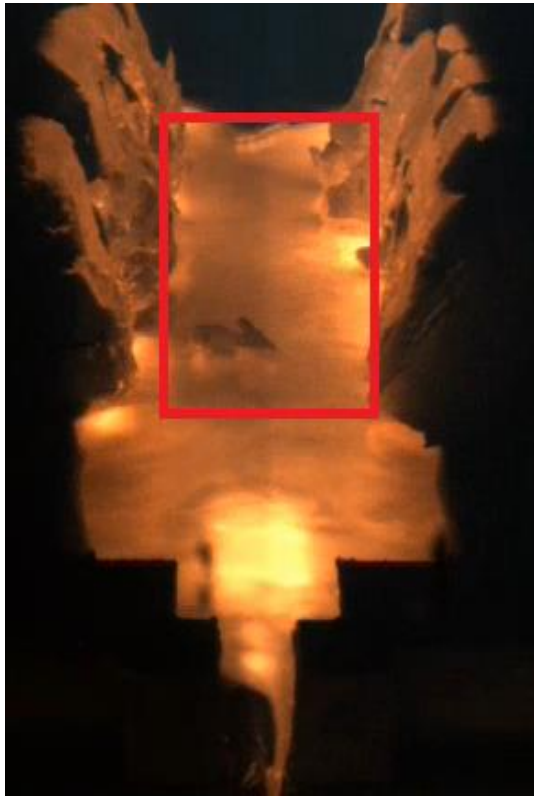
- розподіл температур по поверхні в центральній зоні ПЄ рівномірний;
- включення в розплав з температурою нижче температури плавлення відсутні, окрім зон його контакту з охолоджуваними стінками, дном та щойно потрапившими шматками розплавленої шихти;
- зони перегріву розплаву вище допустимих значень відсутні, за виключенням поточних зон обігріву електронним променем;
- середня температура розплаву в ПЄ $T_{\text{сер}} = 2053 \text{ K}$, а відносний об'єм розплавленого металу $\nu_{\text{розп}} = 80.7\%$.

На рис. 5.5 показано перехід з режиму роботи по стандартному алгоритму до алгоритму зі зворотним зв'язком по температурі, у зв'язку з потраплянням в ПЄ нерозплавленого шматка шихти (рис 5.5а...в). При цьому за алгоритмом D окрім нерозплавленого шматка шихти обігривається також і вся зона дії ЕПГ. Після розплавлення шихти рух електронного променя відбувається по стандартній траєкторії (рис. 5.5 г) до нової появи квадрата з температурою менше за температуру плавлення титану. Рівномірність отриманих температурних полів можна оцінити порівнявши їх візуально з реальним зображення розплаву в ПЄ ЕПУ ВМО (рис. 5.6).

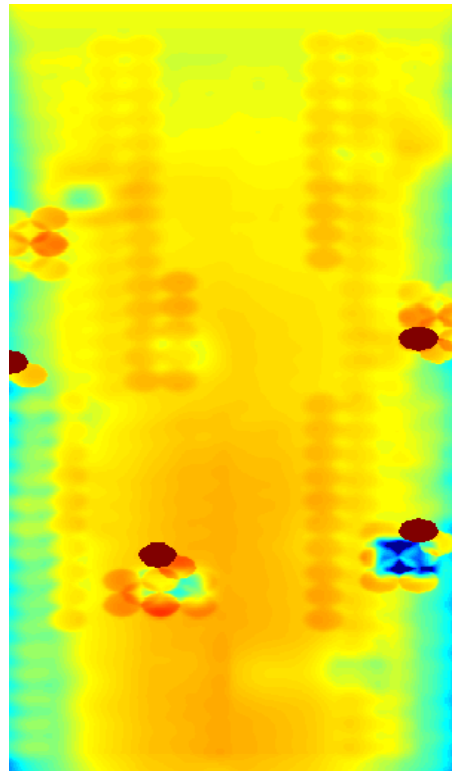


а б в г

Рис. 5.5. Обігрів нерозплавленого шматка шихти



а



б

Рис. 5.6. Порівняння реального зображення дзеркала розплаву в ПЄ (а) із змодельованим з урахуванням роботи механотронної системи керування при ЕПП (б)

5.3. Оцінка ефективності роботи розробленої механотронної системи керування виплавкою титану та роботи електронно-променевої установки керованої оператором

Оцінка ефективності розробленої системи проводилась в порівнянні з роботою ЕПУ керованої оператором. На рис. 5.7 представлено графік наплавлення зливку з прямокутним поперечним перерізом 0.22×1.3 м. Час наплавлення зливку, можна розділити на три періоди:

- 1 – вихід на робочий режим (формуванні затравки, прогрів шихти в ПЄ, повне заповнення ПЄ розплавом);
- 2 – плавка;

- 3 – формування усадочної раковини, завершення технологічного процесу.

Періодом роботи запропонованої механотронної системи керування виплавою титану є період 2. Для цього періоду був побудований графік зміни маси зливку в часі (рис. 5.8). Показано що за час 8 год 20 хв виплавляється ≈ 5400 кг маси зливку. Середня масова витрата титану під час періоду 2 складає $Q_M \approx 648$ кг/год.

Лзл, мм

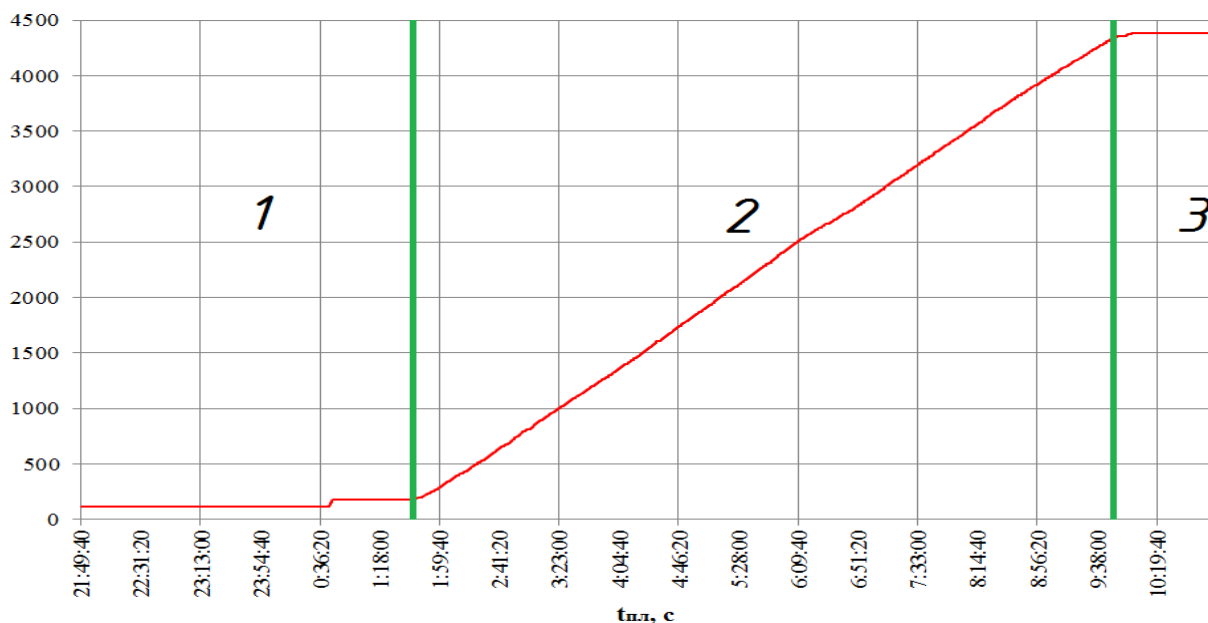


Рис. 5.7. Зміна довжини зливку в часі при роботі оператора ЕПУ ВМО

Мфакт, кг

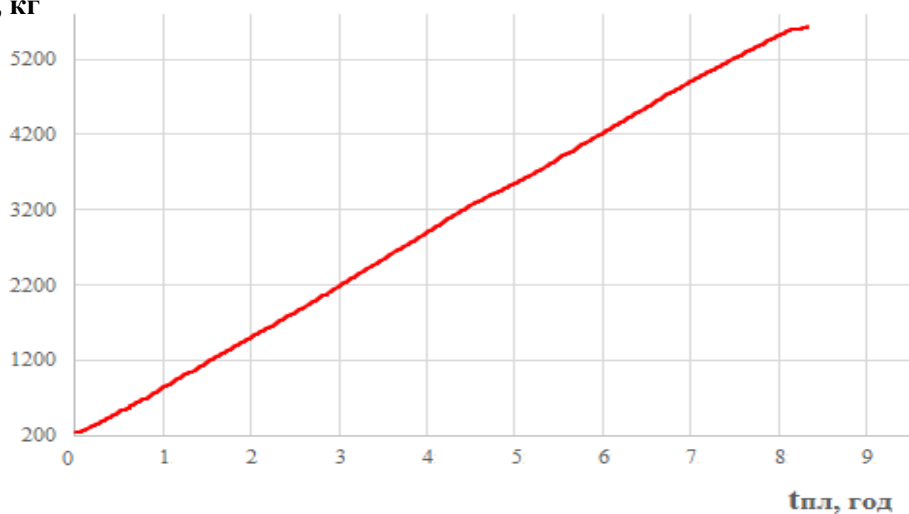


Рис. 5.8. Зміна маси зливку в часі

Побудувавши графік залежності зміни маси зливку в часі, який отриманий при чисельному моделюванні роботи механотронної системи керування виплавою титану, можна визначити масову витрату розплаву (рис. 5.9). Так при $t_m = 120$ с маса зливку складає $M_{\text{теор}} = 25$ кг, а отже масова витрата розплаву в ПЄ складає $Q_m^* \approx 750$ кг/год, що на $\approx 16\%$ більше за масову витрату отриману під час експерименту (рис. 5.10). В середньому на кожну з ЕПГ припадає по 187.5 кг/год витрати розплаву, що згідно рис. 5.2 при потужності обігріву ЕПГ $Q_{\text{ЕПГ}} = 300$ кВт забезпечує необхідний вміст алюмінію в готовому зливку.

Наплавлення зливку масою 5400 кг механотронною системою керування виплавою титану при масовій витраті $Q_m^* \approx 750$ кг/год в періоді 2 (рис. 5.10) триває 7.2 год, а оператором ЕПУ при масовій витраті $Q_m \approx 648$ кг/год – 8.33 год. Час виплавки зливку та енергоспоживання при роботі розробленої системи зменшується на $\approx 14\%$.

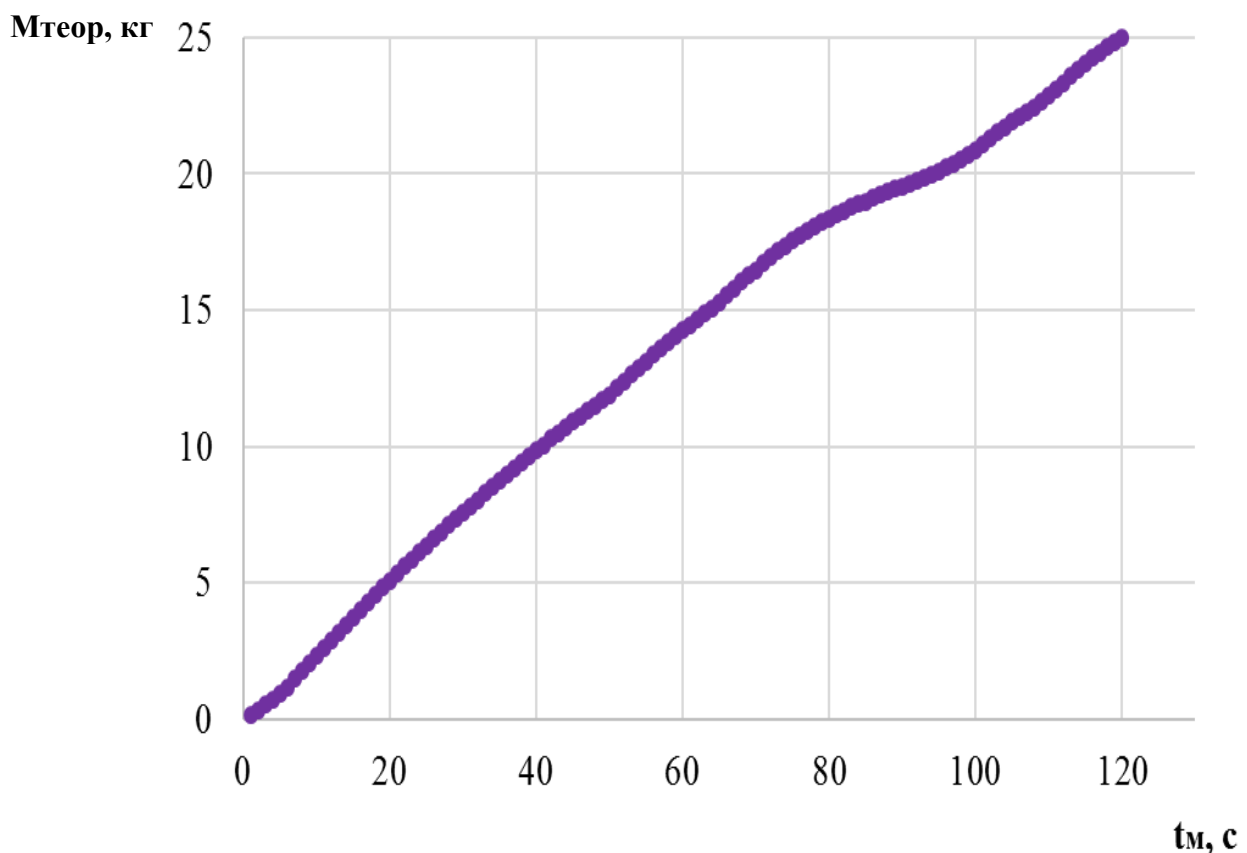


Рис. 5.9. Змодельована зміна маси зливку в часі

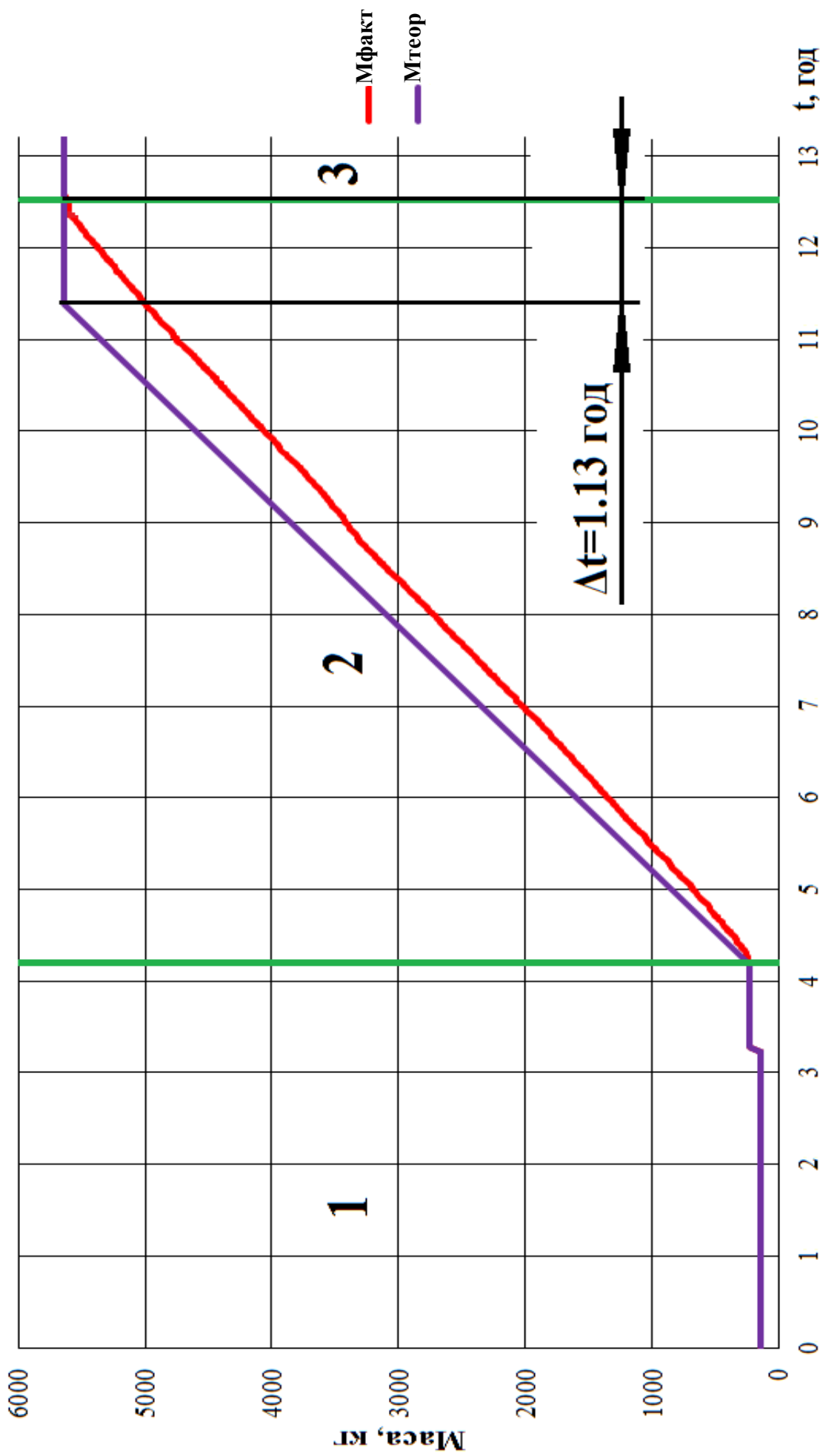


Рис. 5.10. Залежності зміни маси зливка в часі при роботі оператора ЕПУ ($M_{\text{факт}}$) та запропонованої механотронної системи керування плавкою титану ($M_{\text{теор}}$)

Враховуючи зменшення втрат при подальшій обробці готового зливку з 10% до 7% його маси, завдяки подачі додаткових коливань, розраховано загальне підвищення ефективності механотронної системи керування виплавкою титану у порівнянні з роботою оператора ЕПУ.

Приймається, що продуктивність виплавки з оператором – 100%. Втрати маси зливку при обробці після виплавки згідно проведеного аналізу складають до 10%.

Продуктивність виплавки механотронної системи у порівнянні з роботою оператора ЕПУ – 116%, а втрати маси зливку при обробці завдяки подачі додаткових коливань становлять до 7%.

Тоді загальне підвищення ефективності розробленої механотронної системи у порівнянні з роботою оператора ЕПУ дорівнює:

$$\Delta\eta = 116\% \cdot \frac{(100\% - 7\%)}{100\%} - 100\% \cdot \frac{(100\% - 10\%)}{100\%} \approx 18\%. \quad (5.2)$$

Використання запропонованої механотронної системи можливе також і для виплавки інших тугоплавких та високореакційних металів методом ЕПП, оскільки технологічні процеси є подібними. Однак при цьому необхідно враховувати специфічні особливості кожного металу [77, 131].

Повноцінне проведення дослідження ефективності запропонованої механотронної системи керування виплавкою титану можливе тільки у виробничих умовах. У дисертаційній роботі проведено часткове дослідження системи, а саме керування траєкторією руху електронного променя, витягування зливку з кристалізатора з подачею на нього додаткових коливань по заданому закону та керування подачею шихти в зону плавки.

5.4. Висновки

1. Розроблена механотронна система керування виплавкою титану при ЕПП зі зворотними зв'язками по температурі розплаву в ПС та зміні рівня

розплаву в кристалізаторі, яка забезпечує додаткове керування механізмом подачі шихти в зону плавки.

2. Проведено математичне моделювання роботи механотронної системи керування виплавою титану при ЕПП. Отриманні температурні поля порівняні з реальним зображенням титанового розплаву в ПЄ. Показано, що:

- розподіл температур по поверхні ПЄ рівномірний;
- включення в розплав з температурою нижче температури плавлення відсутні, окрім зон з щойно потрапившими шматками шихти;
- зони перегріву розплаву вище допустимих значень відсутні, за виключенням поточних зон обігріву електронного променю.

3. Запропонована механотронна система керування виплавою титану при ЕПП дозволяє:

- підвищити продуктивність процесу виплавки на 16%;
- зменшити час плавки та енергоспоживання на 14%;
- зменшити вплив людського фактору на технологічний процес ЕПП вцілому.

4. Очікується загальне підвищення ефективності механотронної системи керування виплавою титану в порівнянні з роботою оператора ЕПУ (з урахуванням зменшення втрати маси зливку при обробці зливку завдяки подачі додаткових коливань до 7%) на 18%.

5. Використання запропонованої механотронної системи керування виплавою можливе також для інших тугоплавких та високореакційних матеріалів з урахуванням специфіки їх плавлення.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень даного розділу наведено в таких публікаціях:

1. Цибрій Ю.О. Мехатронна система керування плавкою титану зі зворотним зв'язком по температурі та по рівню розплаву в кристалізаторі / Ю.О. Цибрій // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля: – 2017. – №5 (235) – С. 100 – 105.

2. Грабовський Г.Г. Механотронна система керування плавки титану / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XVII міжнародної науково-технічної конференції. – Черкаси: Академія пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля МНС України, 2012. – С.114 – 116.

3. Цибрій Ю.О. Розробка мехатронної системи керування електронно-променевою плавкою титану / Ю.О. Цибрій // 13-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові. Матеріали симпозіум. – Львів, 2017. – С. 209 – 210.

4. Цибрій Ю.О. Мехатронна система керування плавкою титану із використанням зворотного зв'язку по температурі та по рівню розплаву в кристалізаторі / Ю.О. Цибрій, Г.Г. Грабовський // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XXII міжнародної науково-технічної конференції. – Черкаси, 2017. – С.114 – 115.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана актуальна науково-практична задача розробки механотронної системи керування виплавою титану при ЕПП, яка забезпечує підвищення ефективності роботи ЕПУ завдяки ресурсо- та енергозбереженні при високій якості готових титанових зливків. Під час виконання роботи отриманні наступні теоретичні та практичні результати:

1. На основі проведеного аналізу літературних джерел сучасного стану виплавки тугоплавких металів методом електронно-променевої плавки встановлено, що існуючі технології виплавки титану мають недоліки, пов'язані з низьким рівнем автоматизації та неузгодженістю керування процесами плавки, витягуванням зливку з кристалізатора та подачі шихти в зону плавки. Застосування новітніх комп'ютерних технологій та програмних засобів дозволить розробити нову ефективну механотронну систему керування виплавою титану, яка узгоджує керування процесами плавки, витягування зливку та подачі шихти, що забезпечить роботу електронно-променевої установки в режимі ресурсо- та енергозбереження при високій якості отримуваної продукції.

2. Запропонована і теоретично обґрунтована принципова схема механотронної системи керування виплавою титану при електронно-променевої плавці з використанням зворотного зв'язку по температурі розплаву в проміжній ємності та по рівню розплаву в кристалізаторі, яка дозволяє підвищити продуктивність процесу.

3. Розроблено нестационарну тривимірну математичну модель процесу в проміжній ємності та проведено її чисельний розв'язок в програмному пакеті MATLAB із врахуванням впливу зміни джерела нагріву та швидкості течії розплаву в процесі моделювання за заданим законом, що дозволило дослідити вплив технологічних параметрів плавки на тепло-масообмін в проміжній ємності.

4. Отримані аналітичні залежності середньої температури розплаву в проміжній ємності та відношення розплавленого об'єму титану до загального об'єму проміжної ємності від швидкості течії розплаву, потужності обігріву та коефіцієнту розподілу потужності обігріву по поверхні проміжної ємності, що дозволяє оперативно визначати необхідну траєкторію руху електронного променя та швидкість подачі шихти в зону плавки.

5. Досліджена ефективність роботи механотронної системи керування виплавою титану. Показано, що запропонована система дозволяє знизити вплив людського фактору на перебіг процесу плавлення, зменшити на 14% енерговитрати та підвищити продуктивність виплавки на 16%, а із врахуванням зменшення втрат на обробку зливку підвищити загальну ефективність процесу на 18%.

6. Розроблено новий алгоритм керування траєкторією руху електронного променя по поверхні проміжної ємності електронно-променевої установки зі зворотним зв'язком по температурі за допомогою тепловізора, який дозволяє рівномірно прогріти титановий розплав в проміжній ємності електронно-променевої установки в температурному діапазоні 1950...2200 К при коефіцієнті розподілу потужності обігріву по поверхні проміжної ємності $n=50...60\%$, що забезпечує необхідну стабільну витрату титанового розплаву з проміжної ємності в кристалізатор.

7. Запропонована інженерна методика розрахунку мембран гідравлічного мембранного виконавчого механізму на втомну міцність, яка дозволяє здійснити вибір їх раціональних геометричних параметрів в залежності від необхідної амплітуди коливання гідравлічного мембранного виконавчого механізму для заданого ресурсу спрацювань.

8. Запропонований спосіб витягування зливку з кристалізатора з подачею на нього додаткових коливань за заданим законом, що дозволяє здійснювати грубе та точне регулювання рівня розплаву в кристалізаторі, зменшити вірогідність розриву його поверхні та утворення дефектів на готових зливках; очікувати зниження до 7% витрат матеріалу при подальшій обробці зливків.

9. Розроблена нова конструкція гідравлічного мембранного виконавчого механізму двосторонньої дії для подачі додаткових коливань на зливки незалежно від його маси, яка порівняно з гідравлічним циліндром має менші габарити та кращу герметичність.

10. Поставлена в дисертації мета підвищення ефективності процесу виготовлення титанових зливків досягнута, сформульовані задачі вирішені. Практична цінність роботи підтверджена 3 актами впровадження результатів дослідження в практику дослідно-конструкторських робіт проектування систем керування процесом електронно-променевої плавки та 3 актами впровадження результатів дослідження в навчальний процес.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. А.с. 1130615 СССР, МКл С 21 С5 / 56. Устройство для контроля уровня расплава в печи / Геращенко О.А., Грищенко Т.Г., Пальти А.М., Полевилов А.И., Исакаев Д.Х. и Сон К.Ч.; заявитель и патентообладатель Институт технической теплофизики АН УССР, Дагестанский завод электротермического оборудования. – 3634886; заявл. 19.08.1983; опубл. 23.12.1984, Бюл. №47, 1984.
2. А.с. 1786157 СССР, МКл С22 В9 / 22. Способ управления электронно-лучевым переплавом и устройство для его осуществления / Ихоновский А.Л., Николаев Ю.В., Ланкин Ю.Н., Пастушенко Ю.И., Довженко А.Г., Семенов Г. С.; заявитель и патентообладатель Институт электросварки им.е.о.патона,производственно-технический кооператив "Камет" при Институте электросварки им.Е.О.Патона.; – 4885126; заявл. – 26.11.1990; опубл. 07.01.1993 , Бюл. №1,1993.
3. А.с. 583175 СССР, МКл С21 С56. Устройство для вытягивания слитка из кристаллизатора / Сапко А.И., Жук А.Я., Расюк В.И.; заявитель Запорожский индустриальный институт. – 2155263/22-02; заявл. 15.07.1975.; опубл. 05.12.1977, Бюл. №45, 1977.
4. А.с. 836126 СССР, МКл С 21 С5/56, F 27 D 3/00. Механизм вытягивания слитка с кристаллизатора / Кормич А.Т., Дворник В.Г., Бермант В.Р.; – 2821425/22-02; заявл. 24.09.1979.; опубл. 07.06.1981, Бюл. №21, 1981.
5. А.с. № 423561 СССР, МКл В 22 D 11/12. Устройство для вытягивания слитка из кристаллизатора / Вальце. О.А., Быков С.Г. – 1805883/22-2; заявл. 05.07.1972; опубл. 15.04.1974, Бюл. № 14, 1974.
6. Андреев А.Л. Титановые сплавы. Плавка и литье титановых сплавов / Андреев А.Л., Аношкин Н.Ф. и др. – М.: Металлургия. – 1994. – 367 с.
7. Антыкуз О. В. Усовершенствование несинусоидального режима качания кристаллизатора слябовой мнлз / О. В. Антыкуз // Сборник научных трудов ДонГТУ. – 2013. – №40. – С. 116–122.

8. Антыкуз О.В. Обоснование параметров движения кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок и усовершенствование его конструкции: дис. кандидата техн. наук: 05.05.08 / Антыкуз Олег Васильевич. – Д., 2010. – 173 с.
9. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя; В 3 т. Т 1. – 8-е изд., перераб. и доп. Под. ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001. – 920 с.: ил.
10. АСУТП конвертерного производства и специальной электрометаллургии /В.С. Богушевский, А.А. Ларионов, И.Д. Буга, Н.А. Рюмшин, Н.А. Сорокин. – К.: НПК «Киевский институт автоматики», 1997 – 292 с.
11. АСУТП плавильных установок специально электрометаллургии. / Богушевский Грабовский Г.Г., В.С., Чернега Д.Ф., Кожухар В.Я. – К.: Техніка. 2002. – 211с.
12. Ахонин С. В. Моделирование процессов испарения легирующих элементов из сплава Ti-6Al-4V при электронно-лучевой плавке с промежуточной емкостью и порционном сливе / С. В. Ахонин, А. С. Миленин, А. В. Самофалов. // Современная электрометаллургия. – 2007. – №2. – С. 12–16.
13. Ахонин С.В. К вопросу создания системы автоматического регулирования процесса ЭЛП тугоплавких металлов // Проблемы СЭМ. – 1994. – №1. – С. 49 – 52.
14. Ахонин С.В., Мовчан Б.А. Некоторые закономерности электронно-лучевого испарения металлов из «горячего источника» // Проблемы СЭМ. – 1996. – №2. – С. 17 – 25.
15. Ахонин Д.С. Исследование распределения примесей в слитках титана электронно-лучевой плавки методами математического моделирования / Д. С. Ахонин, С. Н. Ратиев // Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. Металургія. – 2010. – Вип. 12. – С. 301 – 308.

16. Бажанова А. Ю. Моделі та методи аналізу пружно-дисипативних систем в САПР : дис. канд. техн. наук : 05.13.12 / Бажанова Анастасія Юріївна – Одеса, 2015. – 146 с.
17. Беляев Ю. Б. Исследование и разработка гидравлических устройств градуировки преобразователей усилий в клетях автоматизированных станов : дис. канд. техн. наук : 05.13.05 / Беляев Юрий Борисович – Киев, 1979. – 165 с.
18. Беляев Ю. Б. Мембранные гидрокапсулы в приборах и исполнительных механизмах автоматизированных систем управления / Ю. Б. Беляев, Ю.В. Орловский. – Київ: ГНПП «АИСТ», 2002. – 72 с.
19. Беляев Ю. Б. Методы и устройства силовой настройки автоматизированных систем управления прокатных станов: теория и практика [Текст] : Дис. д-ра техн. наук: 05.13.08 / Беляев Юрий Борисович; Научно-производственная корпорация "Киевский ин-т автоматизики", Государственное НПП "Автоматизированные информационные системы и технологии". – К., 1997. – 267 с.
20. Беляев, Ю. Б. Гидродомкраты повышенной точности для измерения больших усилий / Ю. Б. Беляев // Современные средства измерения усилий на прокатных станах. – 1983. – № 5. – С. 19 – 22.
21. Беляев, Ю. Б. Исследование однофазовой металлической многослойной мембраны для гидравлических измерителей больших усилий / Ю. Б. Беляев // Разработка и внедрение средств автоматизации и автоматизированных систем управления. – 1979. – № 1. – С. 68 – 72.
22. Беляев, Ю. Б. Тарировочное и нагружающее силоизмерительное гидравлическое устройство повышенной точности / Ю. Б. Беляев, П. П. Тартаковський, Н. Д. Шевченко // Журн. Автоматизация прокатных станов. – 1976. – № 11. – С. 258 – 262.
23. Беляев, Ю. Б. Гидравлическая установка для градуировки средств измерения усилий прокатки металла/ Ю. Б. Беляев, Ю. С. Лихницкий, П.

- П. Тартаковський // Сб. науч. трудов КИА СССР. АСУ ТП в прокатном производстве. – 1978. – С. 137 – 145.
24. Берендеев Н. Н. Применение системы ANSYS к оценке усталостной долговечности. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Новые подходы в исследованиях и разработках информационно-телекоммуникационных систем и технологий» / Н. Н. Берендеев. – Нижний Новгород, 2006. – 83 с.
 25. Богданович В. И. Физико-химические механизмы электрофизических методов, применяемых в производстве летательных аппаратов / В. И. Богданович. – Куйбышев: авиац. ин-т. Куйбышев, 1990. – 54 с.
 26. Богушевський В.С., Чернега Д.Ф., Грабовський Г.Г. Автоматичні системи керування процесами спеціальної електрометалургії. – К.: Техніка. 2002. – 211с.
 27. Болгарский А.В. Термодинамика и теплопередача. Учебн. Для вузов. Изд.-е перераб. и доп. / Болгарский А.В., Мухачев Г.А., Щукин В.К. – М.: Высшая школа, 1975. – 495 с.
 28. Бубнов В. А. Механизм упрочнения аустенитных сталей при пластическом деформировании / В. А. Бубнов, С. Г. Костенко. // Известия вузов. Машиностроение. – 2008. – №6. – С. 63 – 70.
 29. Газоразрядные электронно-лучевые пушки // ПрАТ "НВО "Червона Хвиля" / [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://chervonahvilya.com/index.php?p=research&pp=rdguns&lang=ru>, вільний. – Загол. з екрану.
 30. Галецький Л.С., Ремезова О.О. Стратегія розвитку мінерально-сировинної бази титану України // Геологічний журнал. – 2011. – №3. – С. 66 – 72.
 31. Гармата В.А., Петрунько А.Н., Глицкий А.Н. и др. Титан – М.: Металлургия, 1983. – 559с.
 32. Грабовский Г. Г. ИАСУ толстолистовыми прокатными станами. – К.: Техніка, 2001. – 448 с.

33. Грабовський Г.Г. Керування температурою титанового розплаву в проміжній ємності при електронно-променевої плавці. / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Автоматика: Матеріали доповідей ХХ міжнародної конференції з автоматичного управління, присвяченої 100-чю з дня народження академіка НАНУ О.Г. Івахненка. – Миколаїв: Національний університет кораблебудування, 2013. – С.181.
34. Грабовський Г.Г. Механотронна система керування плавкою титану. Постановка задачі / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Промислова гідравліка та пневматика. – 2012. – № 1 (35). – С.101 – 105.
35. Грабовський Г.Г. Система витягування зливку з кристалізатору / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали ХVІІІ міжнародної науково-технічної конференції. – Київ: НТУУ «КПІ», 2013. – С.98 – 99.
36. Грабовський Г.Г. Механізм витягування зливку з кристалізатора / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Промислова гідравліка і пневматика. Матеріали конференції. – Мелітополь: Таврійський державний аграрно-технічний університет, 2014. – С.62.
37. Грабовський Г.Г. Механотронна система керування плавки титану / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали ХVІІ міжнародної науково-технічної конференції. – Черкаси: Академія пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля МНС України, 2012. – С.114–116.
38. Грабовський Г.Г. Моделювання процесу обігріву розплаву титану з урахуванням його течії. Постановка задачі / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали ХІХ міжнародної науково-технічної конференції. – Кіровоград, 2014. – С.110 – 111.
39. Грабовський Г.Г. Моделювання процесу обігріву розплаву титану з урахуванням його течії. Аналіз результатів моделювання. / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній

- практиці: матеріали XX міжнародної науково-технічної конференції. – Київ, 2015. – С.43–45.
40. Грабовський Г.Г. Розрахунок мембрани гідравлічного мембранного механізму на втомну міцність / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // XVII міжнародна науково-технічна конференція АС ППП «Промислова гідравліка і пневматика». Матеріали конференції. – Харків: Український державний університет залізничного транспорту, 2016. – С.125 – 126.
 41. Грабовський Г.Г. Розрахунок на міцність мембрани гідравлічного мембранного механізму / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XXI міжнародної науково-технічної конференції. – Київ, 2016. – С.155–157.
 42. Грабовський Г.Г. Система керування витягуванням титанового зливку з кристалізатора при електронно-променевої плавці / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Промислова гідравліка та пневматика. – 2013. – № 2 (40). – С.5–10.
 43. Дембровский В.В. Технологические измерения и приборы в металлургии: Учеб. пособие / В.В. Дембровский. – СПб.: СЗТУ, 2004. – 70 с.
 44. Демченко В.Ф. Исследование распределенных характеристик электронного пучка, формируемого кольцевым катодом при электронно-лучевой зонной плавке / В.Ф. Демченко, Е.А. Аснис, А.Б. Лесной, С.П. Заболотин, Н.Е. Шегельский // Современная электрометаллургия. – 2007. – № 3 (88). – С. 20 – 23.
 45. Дереча А.Я. Производство титановых слитков и слябов способом ЭЛП на установках, разработанных в МК «Антарес» / Дереча А.Я., Собко-Нестерук О.Е, Сухин С.А. // Проблемы специальной электрометаллургии – 2010. – №1. – С.15 – 19.
 46. Добаткин В.И. Слитки титановых сплавов / Добаткин В.И., Аношкин Н.Ф., Андреев Л.Л.. – М.: Металлургия, 1966. – 286 с.

47. Жук. Г.В. О влиянии распределения мощности нагрева металла в кристаллизаторе в процессе ЭЛПЕ на структуру титановых слитков / Г.В. Жук // Современная электрометаллургия. – 2008. – № 2 (91). – С. 17–20.
48. Зубков Л.Б. Космический металл: (все о титане) / Л.Б. Зубков. – М.: Наука, 1987. – 128с.
49. Иевлев Н. Г., Грабовский Г. Г. Математические модели и алгоритмы управления в АСУ ТП толстолистовых прокатных станков. – К.: Техніка, 2001. – 248 с.
50. Исаченко Е. И. Штамповка резиной и жидкостью / Е. И. Исаченко. – М.: Машиностроение, 1967. – 367 с.
51. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. 2–е издание, дополненное и переработанное / Е.И. Казанцев. – М., «Металлургия» –1975.– 368 с
52. Карвацкий А. Н. Теплоелектричний та механічний стан високотемпературних енергоємних промислових агрегатів: дис. д-ра техн. наук : 05.05.13 / Карвацкий Антон Янович. – К., 2010. – 438 с.
53. Ковальчук Д.В., Кондратий Н.П. Электронно-лучевой переплав титана – проблемы и перспективы развития // ТИТАН – 2009. – №1. – С. 30 – 36.
54. Костенко В. И. Реконструкция электронно-лучевой установки ТІСО-15М / В. И. Костенко, П.А. Пап, А. Н. Калинюк, Д.В. Ковальчук, Н.П. Кондратий, В.Б. Чернявский // Современная электрометаллургия. – 2007. – №3. – С. 24–25.
55. Кравец П. И. Прецизионное управление параметрами импульсных газоразрядных источников электронов / П. И. Кравец, С. Б. Тугай. // Вакуумная, плазменная и квантовая электроника. – 2013. – №4. – С. 21–27.
56. Ладохин С. В. Перспективы создания в Украине электронно-лучевых плавильных установок нового поколения / С. В. Ладохин. // ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії. – 2010. – №3. – С. 170 – 173.

57. Лебедев В. А. *Металлургия титана : учебное пособие* / В. А. Лебедев, Д. А. Рогожников ; Уральский федеральный университет. – Екатеринбург : Издательство УМЦ УПИ, 2015. – 194 с. – ISBN 978-5-8295-0406-9.
58. Лоусон Ч. *Численное решение задач метода наименьших квадратов/Пер. с англ.* / Ч. Лоусон, Р. Хенсон. – М.: Наука, 1986. – 232 с.
59. Магунов А. Н. *Измерение нестационарной температуры методом спектральной пирометрии приборы и техника эксперимента/ А. Н. Магунов, А. О. Захаров, Б. А. Лапшинов // Приборы и техника эксперимента.* – 2012. – № 1. – С. 143 – 148.
60. Магунов А. Н. *Измерение температуры объектов с неизвестной излучательной способностью методом спектральной пирометрии / А. Н. Магунов // Научное приборостроение.* – 2010. – том 20. – № 3. – С. 22 – 26.
61. Малышев И.И. *Закономерности образования и размещения месторождений титановых руд* – М.: Гостгеолтехиздат, 1957. – 276с.
62. *Математическое моделирование процессов испарения при выплавке слитков многокомпонентных титановых сплавов в электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью / С. В.Ахонин, А. Ю. Северин, В. А. Березос, А. Г. Ерохин. // Современная электротехнология.* – 2013. – №4. – С. 34 – 39.
63. Махнович С. В. *Расчёт деформирования гофрированной оболочки под действием избыточного давления / С. В. Махнович, А. М. Овчинников. // Наука ЮУрГУ: материалы 66-й научной конференции Секции технических наук.* – 2014. – С. 97 – 102.
64. Минакова А.В. *О структуре производства титановой продукции: мировой опыт и реализация в Украине / Минакова А.В., Минаков В.Н., Минаков Н.В., Трефилов В.И. – К: 1998, – (Препр./НАН Украины. Ин-т пробл. материаловедения им. И.Н. Францевича, 98-4), – 22 с.*
65. Мушегян В. О. *Теорія і практика електронно-променевої плавки концентрату молібдену та переробки зливків у напівфабрикати: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.16.02 "Металургія*

- чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів" / Мушегян Вагінак Оганесович – Київ, 2013. – 32 с.
66. Мушегян В. О. Формирование оптимальных режимов электронно-лучевого нагрева при плавке молибдена в установке МВ-1 / В. О. Мушегян, А. А. Тарасюк // Современная электрометаллургия. – 2010. – №4.– С. 16 – 19.
67. Мушегян В.О. Управление электронным нагревом при плавке молибдена в установке МВ-1 / В.О. Мушегян // Сборник научных трудов донбасского государственного технического университета. – 2010.– Вып. 31. С. 131–139.
68. Обзор месторождений титана // Новые химические технологии. Аналитический портал химической промышленности // [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://newchemistry.ru/letter.php?n_id=7731, свободный. – Загл. с экрана.
69. Особенности механизмов качания кристаллизатора с гидравлическим приводом / А. Н.Смирнов, О. В. Антыкуз, В. М. Пильгаев, И. Л. Володько. // ВІСНИК Донбаської державної машинобудівної академії. – 2010. – №1. – С. 290–294.
70. Патент 75790 України, МПК С 21 С 56. Спосіб одержання зливків титанових сплавів з застосуванням двостадійного витягування / Березос В.О., Жук Г.В., Тригуб М.П., Северин А.Ю., Варич І.Ю.; заявник та правовласник Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України. – №20040706322; заявл. 29.07.2004; опубл. 15.05.2006, Бюл. №5, 2006.
71. Патент 2027783 Российской Федерации, МПК С 22 В 9/22. Способ электронно-лучевого переплава металла / Метте В.Л., Косенко В.П., Радченко В.Н., Цораев А.К.-С., Лозовской И.Н., Дробышев В.А., Зиновьев В.Г., Чистов Ю.И., Коронцевич В.К.; заявитель и патентообладатель Всероссийский научно-исследовательский институт неорганических материалов им. акад. А.А. Бочвара; Производственное объединение

- «Улыбинский металлургический завод». – № 4630337/02; заявл. 02.01.89; опубл. 20.01.1995. Бюл. №3., 1995.
72. Патент 83540 України, МПК: В22D 27/02, С22В 9/22, С22В 9/04; Електронно-променева установка / Кондратий Н.П., Васюра В.Н., Тур А.А., Чайка Н.В., Ирха Е.Ю., Скляр А.Л., Чернявский В. Б.; – а200609604; заявл. 06.09.2006; опубл. 25.07.2008, Бюл. № 14.
73. Патент № 91877 України. МПК В22D 29/00 F16Н 43/00. Система витягування зливка з кристалізатора / Грабовський Г.Г., Цибрій Ю.О., Пап П.А., Дереча О.Я.; заявники та правовласники Грабовський Г.Г., Цибрій Ю.О., Пап П.А., Дереча О.Я. – № 201311382, заявл. 26.09.2013, опубл. 25.07.2014, бюл. Бюл.№ 14, 2014 р.
74. Патент № 91889 України. МПК F16Н 43/00. Гідравлічний мембранний виконавчий механізм двосторонньої дії / Грабовський Г.Г., Цибрій Ю.О.; заявники та правовласники Грабовський Г.Г., Цибрій Ю.О. – № 2013 13334, заявл. 15.11.2013, опубл. 25.07.2014, бюл. Бюл.№ 14, 2014 р.
75. Патон Б. Е. Компьютерное управление процессом электронно-лучевой сварки с многокоординатными перемещениями пушки и изделия / Б. Е. Патон, О. К. Назаренко, В. М. Нестеренков, А. А. Морозов, В. В Литвинов, В. В. Казимир // Автомат. сварка. – 2004. – № 5. – С. 3 – 7.
76. Патон Б. Е. Перспективы использования титана в атомной энергетике Украины / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин // Современная электрометаллургия. – 2009. – № 2. – С. 23 – 26.
77. Патон Б.Е., Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорреакционных металлов / Б.Е. Патон, Н.П. Тригуб, С.В. Ахонин. – К.: Наукова думка, 2008. – 312 с.
78. Первунина А. А. О вещественном составе титаноциркониевых россыпей мальшевского месторождения / А. А. Первунина // Загальні питання технології збагачення. – 2012. – №50. – С. 1 – 3.
79. Петров А.К. Получение слитков электроннолучевого переплава с качественной поверхностью/ Петров А.К., Мовчан Б.А., Антропов О.Ф.,

- Сапко А.И. // Проблемы специальной металлургии. (Сборник статей) – К., Наукова думка, 1975. – С. 66. – 69.
80. Петров И. Б. Лекции по вычислительной математике: Учебное пособие / И.Б. Петров, А. И. Лобанов. – М: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 528 с.
81. Применение электронно-лучевой плавки для получения изделий медицинского назначения / [С. В. Ладохин, Н. И. Левицкий, Т. В. Лапшук та ін.]. // Металл и литьё Украины. – 2015. – С. 7–11.
82. Расчет деформирования гофрированной оболочки под действием избыточного давления: Наука ЮУрГУ [Электронный ресурс]: / [С.В. Махнович, А.М. Овчинников, И. А. Волошина та ін.]. // материалы 66-й научной кон- ференции. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – С. 97 – 102.
83. Расчет упругих характеристик измерительных диафрагм датчиков давления / [С. А. Бурцев, И. А. Волошина, С. В. Махнович та ін.]. // Вестник ЮУрГУ. – 2005. – №14. – С. 32–36.
84. Римен. В.Х. Усилия вытягивания крупных слитков из кристаллизатора при электроннолучевом переплаве / Римен. В.Х., Галентовский Г.Г. // Специальная электрометаллургия – 1982. – № 49. – С.73–76.
85. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке: [Учеб. пособие для машиностроит. вузов] / Н. Н. Рыкалин, проф. д-р техн. наук. – Москва: Машгиз, 1951. – 296 с. : ил.; 23 см.
86. Сергиенко С. Н. Ресурсосберегающая технология получения слитков титана на установке электронно-лучевого переплава с промежуточной емкостью: дис. кандидата тех. наук: 05.16.02 / Сергиенко Светлана Николаевна. – Орск, 2011 – 134 с.
87. Серенсен С.В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. Руководство и справочное пособие. Изд. 3-е, перераб. и доп. Под ред. С. В.

- Серенсена / Серенсен С.В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
88. Смирнов А.Н. Непрерывная разливка стали / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штепан. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.
89. Смирнов А.Н., Антыкуз О.В. Комплексный контроль параметров качания кристаллизаторов МНЛЗ // *Металл и литье Украины*. – 2009. № 1–2. – С. 57 – 61.
90. Собко-Нестерук О. Е. Новая печь ВТ02 для электронно-лучевой плавки титановых сплавов, разработанная в МК "Антарес" / О. Е. Собко-Нестерук, Н. Г. Третьак, Н. В. Чайка, Ю. В. Непорожний, В. Н. Васюра // *Соврем. электрометаллургия*. – 2012. – № 3. – С. 20 – 25.
91. Соловьев В.Г. Контроль и стабилизация уровня жидкого металла в кристаллизаторе при электронно–лучевой плавке / Соловьев В.Г., Ланкин Ю.Н. // *Современная электрометаллургия*. – 2009. – № 1. – С. 22–27.
92. Тимошенко С. П. Теория упругости / С. П. Тимошенко, Д. Гудьер. – М.: Наука, 1979. – 560 с.
93. Тугай Б.А. Автоматическое управление током газоразрядной электронной пушки с холодным катодом / Б.А. Тугай // *Современная электрометаллургия*. – 2008. – № 3 (92). – С. 25 – 32.
94. Удрис Я.Я.. Электронная пушка высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) как стабильный источник нагрева при повышенном газовыделении / Я.Я.Удрис., В.А. Чернов // *Спец. электрометаллургия*. – 1981. – № 46. – С. 73 – 79.
95. Улановский А.А. Вольфрам-рениевые термозонды в литейном и металлургическом производствах / А.А. Улановский, А.В.Куракин, М.С.Фрольцов, И.Л.Шкарупа // *Литейщик России* – 2006. – №1. – С. 28–33.
96. Цибрій Ю. О. Аналіз напружено-деформованого стану мембрани гідравлічного мембранного механізму приводу витягування з зливку кристалізатора / Ю. О. Цибрій, Г. Г. Грабовський, П. Л. Носко. // *Проблеми тертя та зношування*. – 2017. – №3. – С. 108 – 114.

97. Цибрій Ю.О. Алгоритм керування траєкторією електронного променя при плавці титану / Ю.О. Цибрій // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XXI міжнародної науково-технічної конференції. – Київ, 2016. – С.121 – 123.
98. Цибрій Ю.О. Використання гідравлічних мембранних виконавчих механізмів при витягуванні зливків з кристалізатора плавильної печі / Ю.О. Цибрій, Г.Г. Грабовський // Гідро- та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування. Міжнародна науково-технічна інтернет-конференція. Збірник тез доповідей. – Вінниця, 2014. – С.58 – 59.
99. Цибрій Ю.О. Електронно-променева плавка металу в проміжній ємності зі зворотним зв'язком по температурі / Ю.О. Цибрій // VIII міжнародна конференція молодих учених та спеціалістів. Зварювання та споріднені технології. Матеріали конференції. – смт. Ворзель, Київська обл., 2015. – С. 155.
100. Цибрій Ю.О. Мехатронна система керування плавкою титану зі зворотним зв'язком по температурі та по рівню розплаву в кристалізаторі / Ю.О. Цибрій // ВІСНИК Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля: – 2017. – №6 (240) – С. 76 – 82.
101. Цибрій Ю.О. Мехатронна система керування плавкою титану із використанням зворотного зв'язку по температурі та по рівню розплаву в кристалізаторі / Ю.О. Цибрій, Г.Г. Грабовський // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XXII міжнародної науково-технічної конференції. – Черкаси, 2017. – С. 114 – 115.
102. Цибрій Ю.О. Моделювання розподілу температур титанового розплаву з урахуванням його течії / Ю.О. Цибрій, Г.Г. Грабовський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2014. – №3 (72) – С.65–71.
103. Цибрій Ю.О. Напружено-деформований стан мембрани гідравлічного мембранного механізму приводу витягування з зливку кристалізатора / Ю.О. Цибрій // XVIII міжнародна науково-технічна конференція АС

- ПГП «Промислова гідравліка і пневматика». Матеріали конференції. – Вінниця, 2017. – С.105.
104. Цибрій Ю.О. Розробка гідравлічного мембранного виконавчого механізму для програмованих малих переміщень / Ю.О. Цибрій, Г.Г. Грабовський // XV Всеукраїнська наукова конференція молодих учених та студентів «Наукові розробки молоді на сучасному етапі». – Київ: КНУТД, 2016. – С.172.
105. Цибрій Ю.О. Розробка мехатронної системи керування електронно-променевою плавкою титану / Ю.О. Цибрій // 13-й міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові. Матеріали симпозіум. – Львів, 2017. – С. 209 – 210.
106. Чистяков С. Система измерения температуры и окисленности и отбора проб расплавов стали в электросталеплавильной печи через рабочее окно / С. Чистяков, С. Синявин, А. Савин, Д. Киркин // Современные технологии автоматизации. – 2010. – № 4. – С. 28 – 34.
107. Шиллер З. Электронно-лучевая технология / Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. . – М.: Энергия, 1980. – 528 с.
108. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве : монография / С. В. Ладохин, Н. И. Левицкий, В. Б. Чернявский, Т. В. Лапшук, В. Г. Шмигидин, Л. А. Кравчук, А. С. Гладков; Физ.-технол. ин-т металлов и сплавов НАН Украины. – К. : Сталь, 2007. – 626 с.
109. Электронно-лучевая плавка титана / [Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В.]. – К.: Наукова думка, 2006. – 248 с.
110. Электронно-лучевые печи для титана // КВ-Титан / [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.kv-titan.com/products/1/1>, вільний. – Загол. з екрану.
111. Электронные плавильные печи / [М.Я. Смелянский, А.В. Елютин, А.М. Кручинин, Ю.В. Рогов, Л.Г. Ткачев, В.А. Хотин] под ред. М. Я. Смелянского. – М.: Энергия, 1971. – 167 с.

112. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. Новосибирск: Наука, 1967. – 196 с.
113. Alderson N. A. (2012) Thermal Modeling and Simulation of Electron Beam Melting for Rapid Prototyping on Ti6Al4V Alloys. dissertation Doctor of Philosophy Materials Science and Engineering. North Carolina, 250 p.
114. Ammer R., Markl M., Ljungblad U., Korner C., Rude U. Simulating fast electron beam melting with a parallel thermal free surface lattice Boltzmann method. Computers and Mathematics with Applications, 2013, № 67, pp. 318 – 330.
115. Attar E. (2011) Simulation of Selective Electron Beam Melting Processes. dissertation doktor of ingenieur. Erlangen, 2011, 130 p.
116. Carslaw H., Jaeger J. (1959) Conduction of Heat in Solids, 2 edition. Oxford University Press, USA, 510 p.
117. Cline H. E., Anthony T. R. Heat treating and melting material with a scanning laser or electron beam. Journal of Applied Physics, 1977, № 48, pp. 3895 – 3900.
118. Davim J. P. (2014) Machining of Titanium Alloys. Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 150 p.
119. Zäh F., Lutzmann S., Kahnert M., Walchshäusl F. (2008) Determination of Process Parameters for Electron Beam Sintering (EBS). Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference. Hannover, pp. 1–7.
120. Markl M., Ammerb R., Ljungblad U. (2013) Electron beam absorption algorithms for electron beam melting processes simulated by a three-dimensional thermal free surface lattice Boltzmann method in a distributed and parallel environment. International Conference on Computational Science, ICCS, pp. 2127–2136.
121. Froes F. H. (2015) Titanium Physical Metallurgy Processing and Applications. Asm International, Ohio, 416 p.
122. Gilat A., Subramaniam V. (2011) Numerical Methods with MATLAB. 2nd International edition, Ohio: John Wiley & Sons Ltd, 480 p.

123. Gong X., T. Anderson, Chou K. Review on powder-based electron beam additive manufacturing technology. *Manufacturing Review*, 2014, №1, pp. 1–12.
124. Hassanein A. M. Simulation of plasma disruption induced melting and vaporization by ion or electron beam. *Journal of Nuclear Materials*, 1984, № 122&123, pp. 1453 – 1458.
125. Ivaldo L., Ferreira A. The effect of melt temperature profile on the transient metal/mold heat transfer coefficient during solidification. *Materials Science and Engineering*, Volume 408, Issues 1–2, 2005, pp. 317 – 325.
126. Korner C., Attar E., Heini P. Mesoscopic simulation of selective beam melting processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, № 211, pp. 978 – 987.
127. Markl M., Ammer R., Ljungblad U., Rude U., Korner C. Electron beam absorption algorithms for electron beam melting processes simulated by a three-dimensional thermal free surface lattice Boltzmann method in a distributed and parallel environment. *Procedia Computer Science*, 2013, № 18, pp. 2128 – 2136.
128. Markov A. B., Rotshtein V. P. Calculation and experimental determination of dimensions of hardening and tempering zones in quenched U7A steel irradiated with a pulsed electron beam, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1997, №132, pp. 79–86.
129. Mathews J. H. (2004) *Numerical Methods Using MATLAB* (4th Edition). Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 0 7458, 696 p.
130. Paton B. E., Shpak A.P., Ivasyshyn O.M. (2006) Basic trends of scientific research into the problem of titanium in the Ukraine. *Materials Science*, Vol.42, №3., pp. 287– 298.
131. Paton B.E., Trygub M.P., Akhonin S.V. (2011) *Electron Beam Melting of Titanium, Zirconium and Their Alloys*. Kyiv: Paton electric welding inst., NASU, 216 p.
132. Paton B.E., Trigub N.P., Zhuk G.V. (2008) Crystallization of titanium ingots in the course of electron-beam melting. *Materials Science*, №3, pp. 328 – 335.

133. Tsibriy I., Grabovskiy H. (2015) Heat exchange calculation in the intermediate container under electron-beam melting, Metallurgical and Mining Industry, 2015, №5, pp.51 – 60.
134. Vutova K., Vassileva V., Mladenov G. (1997) Simulation of the heat transfer process through treated metal, melted in a water-cooled crucible by an electron beam. Vacuum, 1997, № 48, pp. 143 – 148.
135. Vutova K., Mladenov G. (1999) Computer simulation of the heat transfer during electron beam melting and refining. Vacuum, № 53, pp. 87 – 91.
136. Vutova K., Donchev V. (2013) Electron Beam Melting and Refining of Metals: Computational Modeling and Optimization. Materials, №6, pp. 4626 – 4640.
137. Zäh M. F., Lutzmann S. (2010) Modelling and simulation of electron beam melting. Production Engineering, №4, pp 15 – 23.
138. Zäh M.F., Kahnert M. (2009) The effect of scanning strategies on electron beam sintering. Production Engineering, №3, pp.217 – 224.
139. Zupei S. (1996) Approximate Calculation of U-shaped Bellows. Tsinghua science and technology, №3, pp. 305 – 309.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А. Програма моделювання тепло-масообміну в проміжній ємності в MATLAB

```
clc
l=0.150;
dx=0.001;
imax=(l/dx)+1;
b=0.4;
dy=0.001;
jmax=(b/dy)+1;
h=0.03;
dz=0.001;
kmax=(h/dz)+1;
aa=0.000007585;
Qrad=0;
ka=1500;
L=zeros(imax,jmax);
R=zeros(10,1);
for ri=1:10
    if ri<=5
        R(ri,1:end)=abs(-
0.006+0.001*ri);
    else R(ri,1:end)=-
0.005+0.001*ri;
    end
end
RR=rot90(R);
L=zeros(imax,jmax);
    for j=21:jmax-21
for i=2:11
L(i,j)=R(i-1,1);
end
end
for i=12:26
for j=371:380
    L(i,j)=RR(1,j-370);
end
end
for j=21:jmax-21
for i=27:36
L(i,j)=R(i-26,1);
end
end
for i=37:46
for j=21:30
    L(i,j)=RR(1,j-20);
end
end
for j=21:jmax-21
for i=47:56
    L(i,j)=R(i-46,1);
end
end
for i=57:71
for j=371:380
L(i,j)=RR(1,j-370);
end
end
for j=21:jmax-21
for i=72:81
L(i,j)=R(i-71,1);
end
end
for i=82:91
for j=21:30
    L(i,j)=RR(1,j-20);
end
end
for j=21:jmax-21
for i=92:101
L(i,j)=R(i-91,1);
end
end
for i=102:116
for j=371:380
L(i,j)=RR(1,j-370);
end
end
for j=21:jmax-21
for i=117:126
L(i,j)=R(i-116,1);
end
end
for i=127:136
for j=21:30
    L(i,j)=RR(1,j-20);
end
end
for j=21:jmax-21
for i=137:146
L(i,j)=R(i-136,1);
end
end
t=1;
dt=1/6;
fmax=(t/dt)+1;
lmb=20;
```

```

qst=235000;
qd=150000;
ee=0.3;
sgm= 5.67*10^-8;
To=1950;
q=1.5*10^6;
ff=0;
fpr=2;
tic
T=repmat(To,[imax jmax kmax]);
TS=T;
AI=zeros(imax,imax);
BI=zeros(imax,1);
DI=zeros(imax,imax);
AI(1,1)=-lmb;
AI(1,2)=lmb;
AI(imax, imax-1)=lmb;
AI(imax,imax)=-lmb;
BI(1,1)=0;
for i=2:(imax-1)
    AI(i,i-1)=aa*dt;
    AI(i,i)=- (dx^2+2*aa*dt);
    AI(i,i+1)=aa*dt;
    DI(i,i)=-dx^2;
end
AJ=zeros(jmax,jmax);
BJ=zeros(jmax,1);
DJ=zeros(jmax,jmax);
AJ(1,1)=-lmb;
AJ(1,2)=lmb;
AJ(jmax, jmax-1)=lmb;
AJ(jmax,jmax)=-lmb;
BJ(1,1)=qst*dy;
BJ(jmax,1)=qst*dy;
for j=2:(jmax-1)
    AJ(j,j-1)=aa*dt;
    AJ(j,j)=- (dy^2+2*aa*dt);
    AJ(j,j+1)=aa*dt;
    DJ(j,j)=-dy^2;
end
AK=zeros(kmax,kmax);
BK=zeros(kmax,1);
DK=zeros(kmax,kmax);
AK(1,1)=-lmb;
AK(1,2)=lmb;
AK(kmax, kmax-1)=lmb;
AK(kmax,kmax)=-lmb;
BK(1,1)=qd*dz;
SKK=zeros(kmax,1);
for k=2:(kmax-1)
    AK(k,k-1)=aa*dt;
    AK(k,k)=- (dz^2+2*aa*dt);
    AK(k,k+1)=aa*dt;

```

```

DK(k,k)=-dz^2;
end
for f=1:fmax
    for k=2:kmax-1
        for j=2:jmax-1
            SI=T(:,j,k);
            AI1=diag(AI,-1);
            AI2=diag(AI);
            AI3=diag(AI,1);
            VI=BI+DI*SI;
            AI3z=zeros(1,imax);
            VIZ=zeros(1,imax);
            AI3z(1)=AI3(1)/AI2(1);
            for w=1:imax-2
                AI3z(w+1)=AI3(w+1)/(AI2(w+1)-
                    AI1(w)*AI3z(w));
            end
            VIZ(1)=VI(1)/AI2(1);
            for w=1:imax-1
                VIZ(w+1)=(VI(w+1)-
                    AI1(w)*VIZ(w))/(AI2(w+1)-
                    AI1(w)*AI3z(w));
            end
            SI(imax)=VIZ(imax);
            for w=imax-1:-1:1
                SI(w)=VIZ(w)-
                    AI3z(w)*SI(w+1);
            end
            T(:,j,k)=SI;
        end
    end
end
for i=2:imax-1
    for k=2:kmax-1
        SJ=T(i, :, k)';
        AJ1=diag(AJ,-1);
        AJ2=diag(AJ);
        AJ3=diag(AJ,1);
        VJ=BJ+DJ*SJ;
        AJ3z=zeros(1,jmax);
        VJz=zeros(1,jmax);
        AJ3z(1)=AJ3(1)/AJ2(1);
        for w=1:jmax-2
            AJ3z(w+1)=AJ3(w+1)/(AJ2(w+1)-
                AJ1(w)*AJ3z(w));
        end
        VJz(1)=VJ(1)/AJ2(1);
        for w=1:jmax-1
            VJz(w+1)=(VJ(w+1)-
                AJ1(w)*VJz(w))/(AJ2(w+1)-
                AJ1(w)*AJ3z(w));
        end
        SJ(jmax)=VJz(jmax);
    end
end

```

```

for w=jmax-1:-1:1
    SJ(w)=VJz(w)-
AJ3z(w)*SJ(w+1);
end
SJ=SJ';
T(i, :, k)=SJ;
    end
end
    for i=1:imax
        for j=1:jmax
            SK=T(i, j, :);
            ll=L(i, j);
BK(kmax, 1)=-dz*ceil(ll)*q*exp(-
ka*ll^2)+(floor(1-ll))*Qrad;
                                for
x=1:kmax
SKK(x, 1)=SK(:, :, x);
                                end

AK1=diag(AK, -1);
AK2=diag(AK);
AK3=diag(AK, 1);
VK=BK+DK*SKK;
AK3z=zeros(1, kmax);
VKz=zeros(1, kmax);
AK3z(1)=AK3(1)/AK2(1);
for w=1:kmax-2

AK3z(w+1)=AK3(w+1)/(AK2(w+1)-
AK1(w)*AK3z(w));
end
VKz(1)=VK(1)/AK2(1);
for w=1:kmax-1
    VKz(w+1)=(VK(w+1)-
AK1(w)*VKz(w))/(AK2(w+1)-
AK1(w)*AK3z(w));
end
SKK(kmax)=VKz(kmax);
for w=kmax-1:-1:1
    SKK(w)=VKz(w)-
AK3z(w)*SKK(w+1);
end
    for x=1:kmax
        SK(:, :, x)=SKK(x, 1);
    end
T(i, j, :)=SK;
    end
    end
    fff=fix(ff/fpr);
                                for k=2:kmax-
1
    for j=2:jmax-1
        T(1, j, k)=To;
    end
    end
    if fff==1
        T1=T;
        for i=imax:-1:2
for k=2:kmax
    for j=2:jmax
        T1(i, j, k)=T(i-1, j, k);
    end
end
    end
        ff=0;
        T=T1;
        TS=T;

Qrad=ee*sgm*dz*((mean(mean(T(:,
:, kmax))))^4- 300^4);
    end
        ff=ff+1;
    end
    toc
    [ii, jj]=meshgrid(0:1:jmax-
1, 0:1:imax-1);
    surf(ii, jj, T(:, :, kmax))
    shading flat

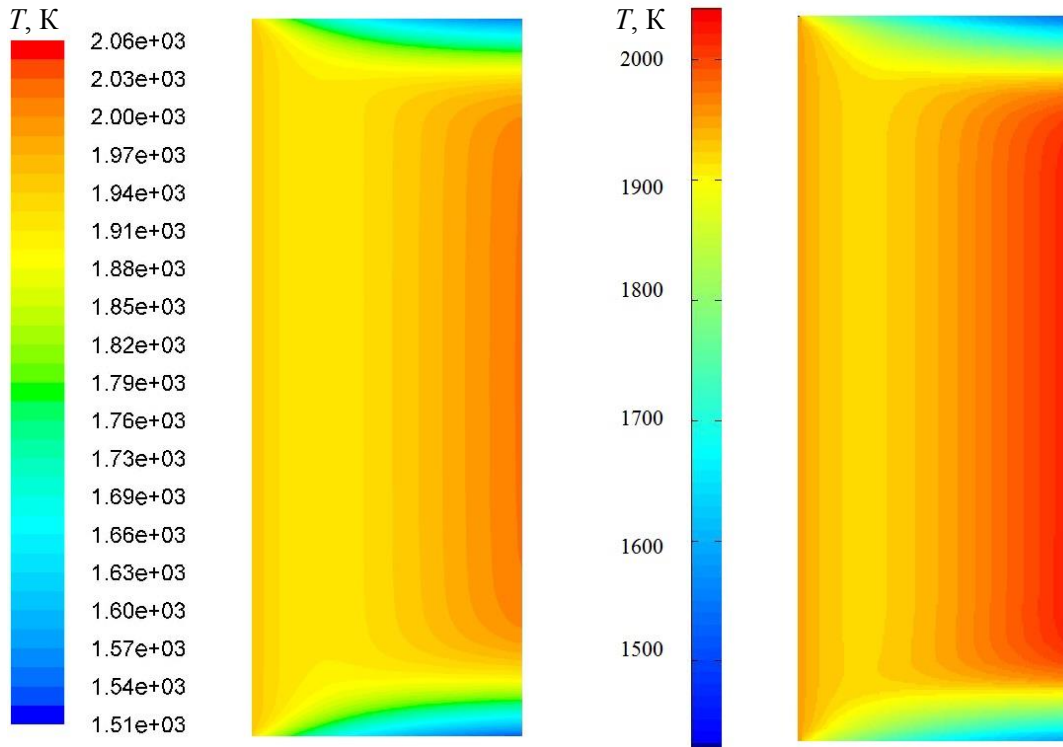
```


ДОДАТОК Б. Порівняння температурних полів отриманих за допомогою MATLAB та ANSYS Fluent

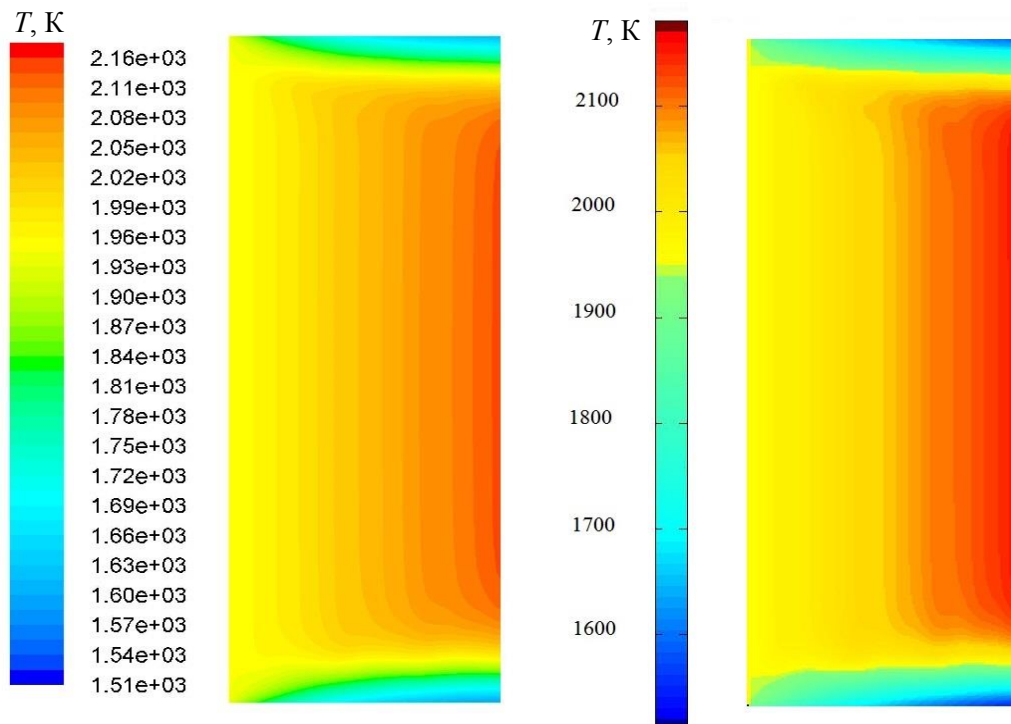
Вихідні параметри:

$$- u = 0.003 \text{ м/с}; q_0 = 1.5 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2; q_{\text{ст}} = 0.235 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2;$$

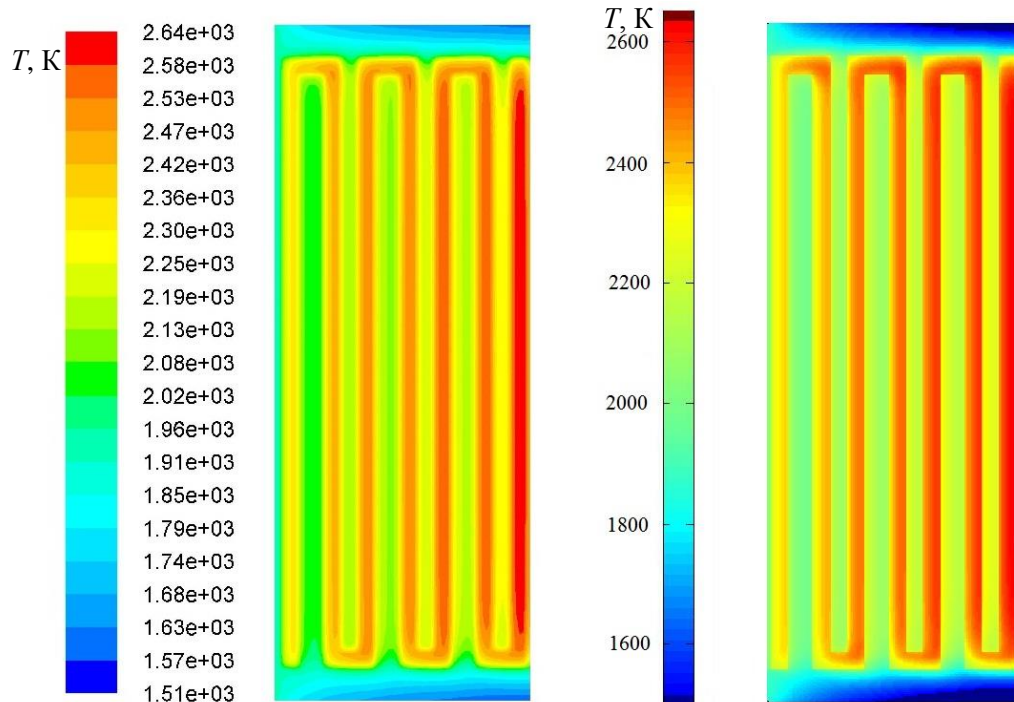
$$q_{\text{д}} = 0.085 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2;$$



$z = 0.005 \text{ м}$



$z = 0.015 \text{ м}$

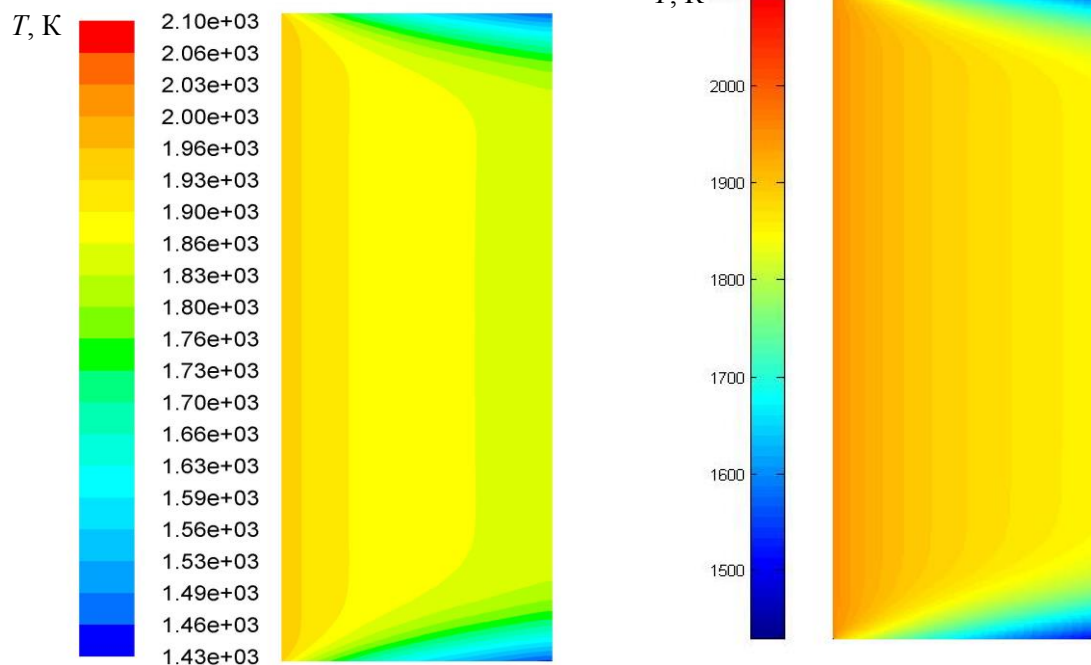


$z = 0.03 \text{ m}$

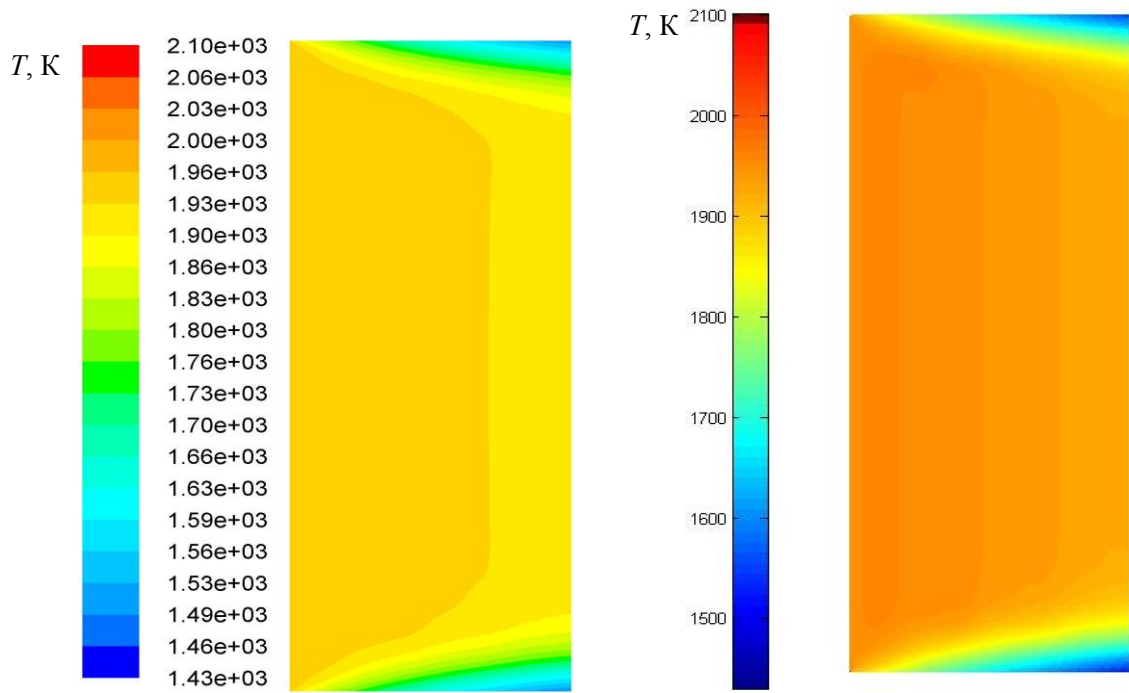
$-u = 0.003 \text{ m/c}; q_0 = 0.5 \cdot 10^6 \text{ BT/M}^2; q_{CT} = 0.235 \cdot 10^6 \text{ BT/M}^2;$
 $q_d = 0.085 \cdot 10^6 \text{ BT/M}^2:$

ANSYS Fluent

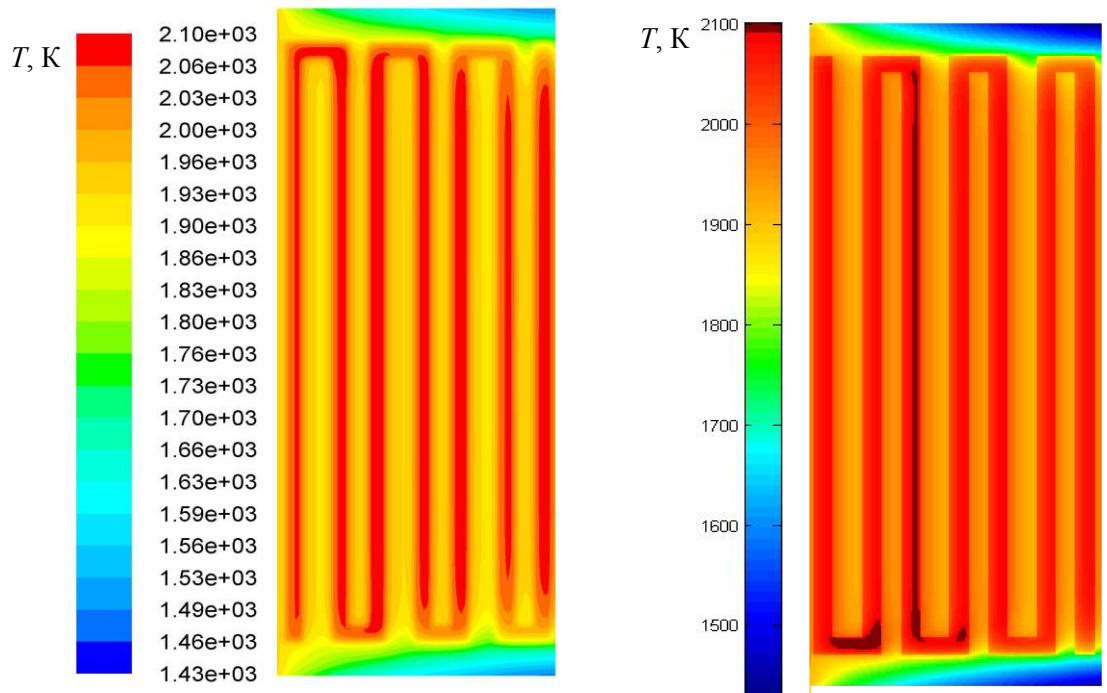
MATLAB



$z = 0.005 \text{ m}$



$z = 0.015$ m

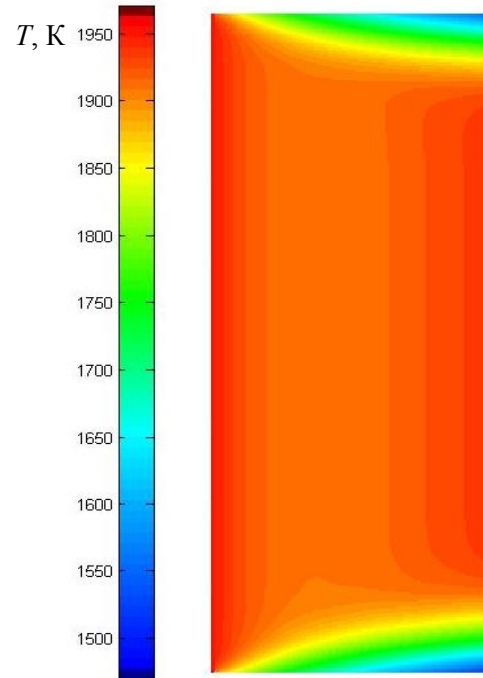
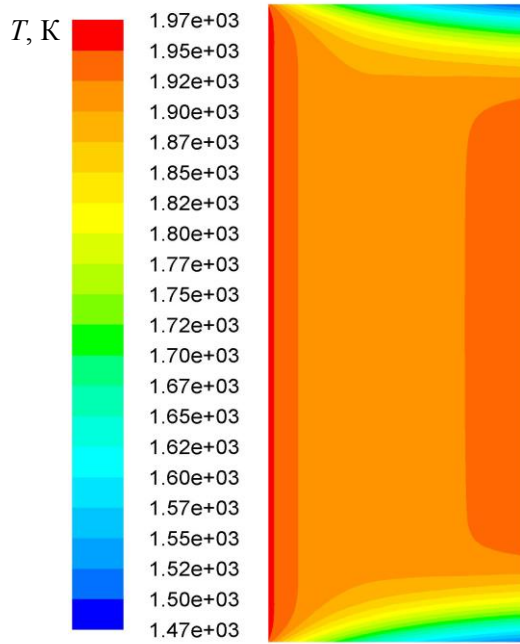


$z = 0.03$ m

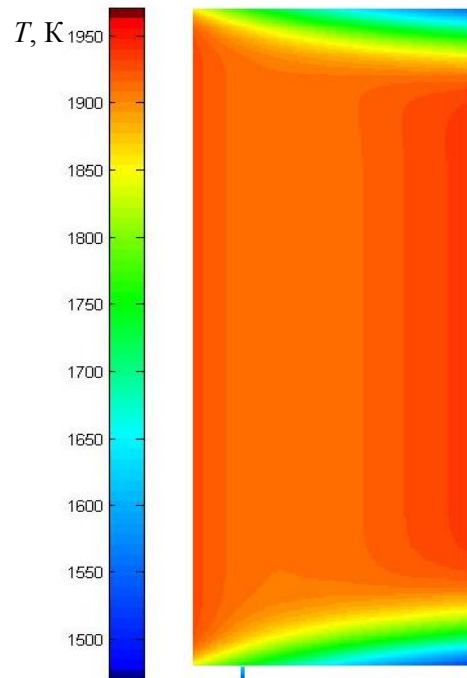
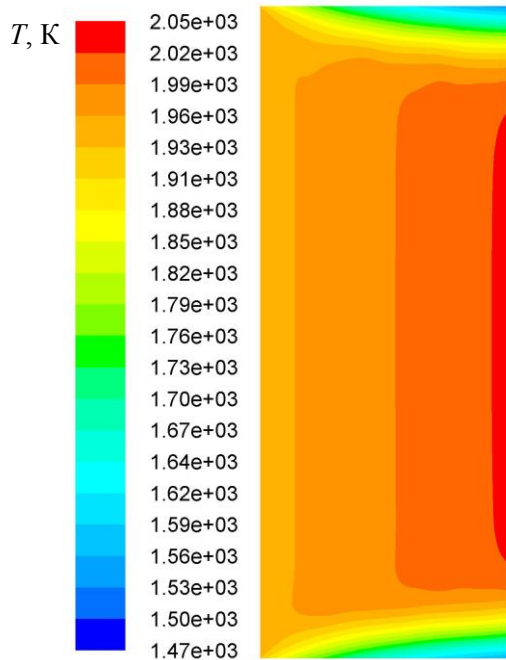
- $u = 0.003 \text{ м/с}$; $q_0 = 1 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$; $q_{\text{CT}} = 0.235 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$;
 $q_{\text{Д}} = 0.085 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$:

ANSYS Fluent

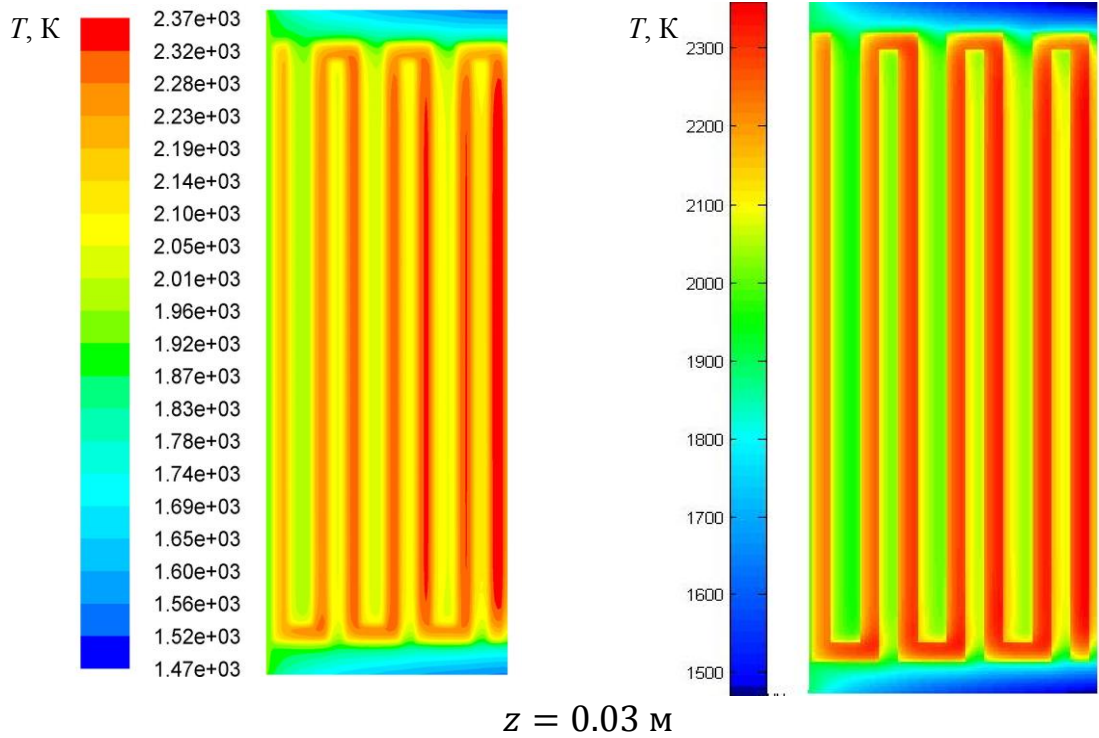
MATLAB



$z = 0.005 \text{ м}$



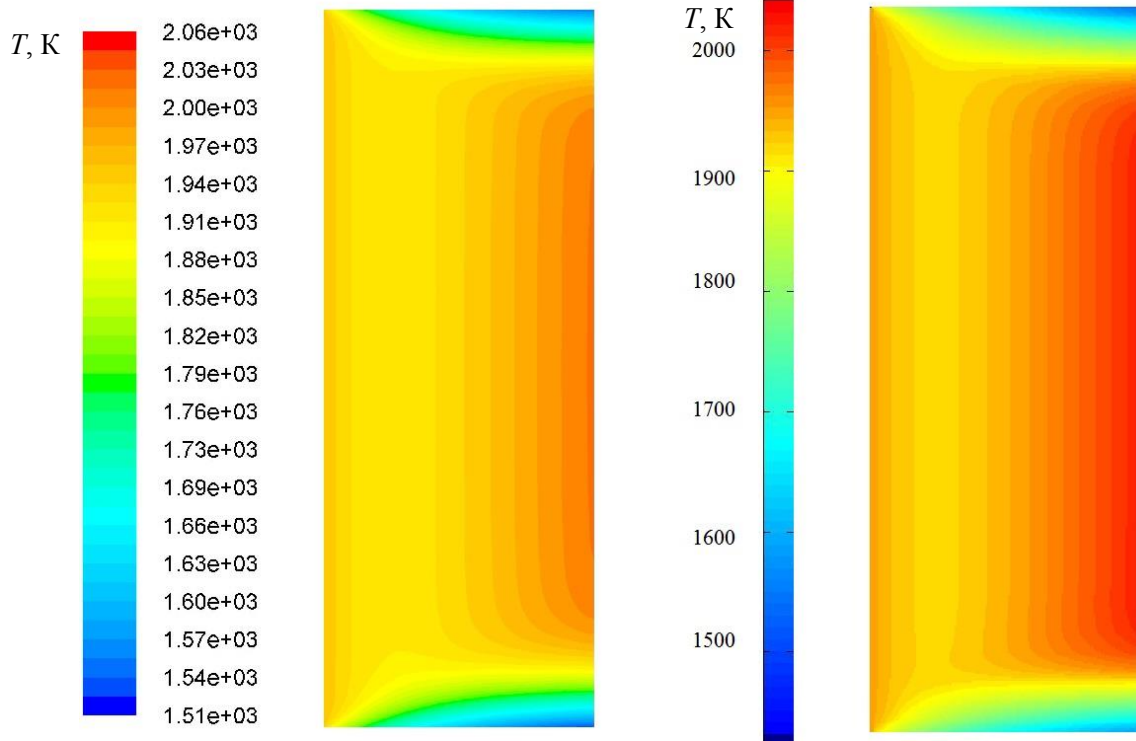
$z = 0.015 \text{ м}$



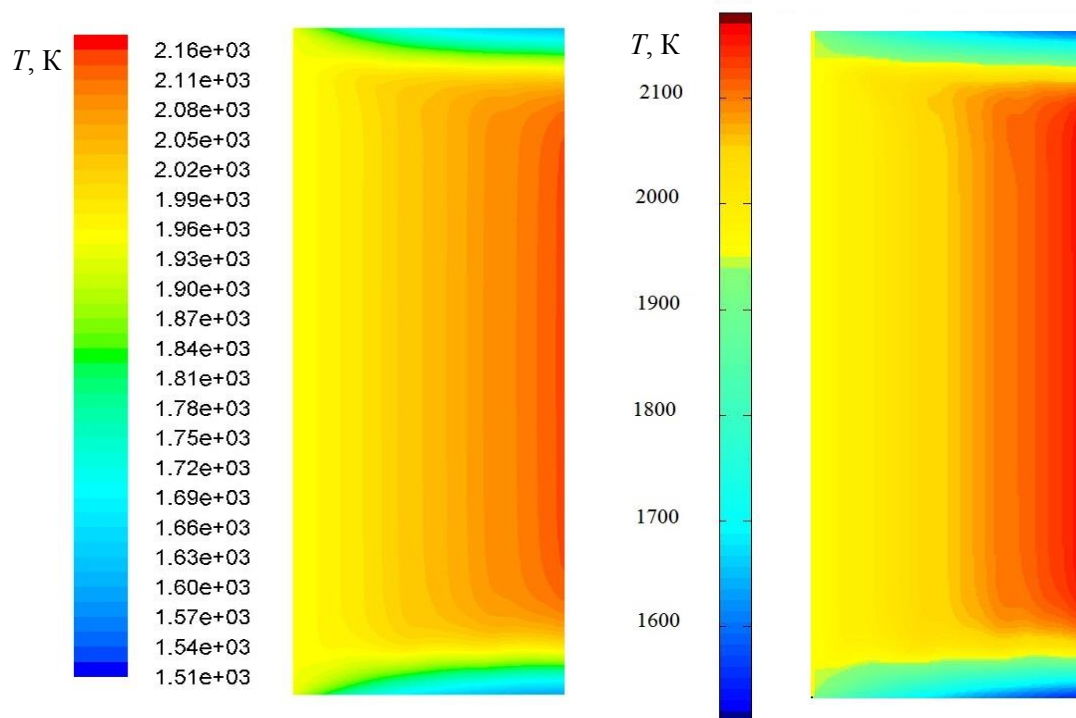
$-u = 0.003 \text{ m/c}; q_0 = 1.5 \cdot 10^6 \text{ Bт/м}^2; q_{\text{CT}} = 0.235 \cdot 10^6 \text{ Bт/м}^2;$
 $q_{\text{д}} = 0.085 \cdot 10^6 \text{ Bт/м}^2:$

ANSYS
Fluent

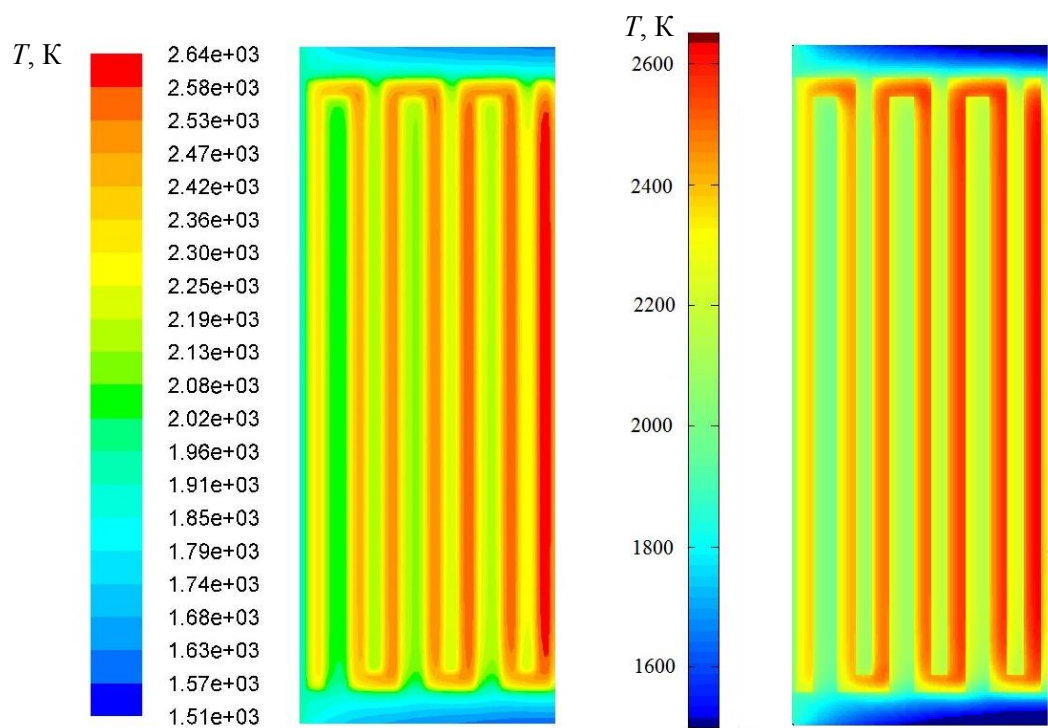
MATLAB



$z = 0.005 \text{ m}$



$z = 0.015$ m



$z = 0.03$ m

ДОДАТОК В. Програма моделювання обігріву проміжної ємності при використанні алгоритму А в MATLAB

```

clc
l=0.150;
dx=0.001;
imax=(l/dx)+1;
b=0.4;
dy=0.001;
jmax=(b/dy)+1;
h=0.03;
dz=0.001;
kmax=(h/dz)+1;
aa=0.000007585;
Qrad=0;
ka=1500;
L=zeros(imax,jmax);
t=30;
dt=1/30;
fmax=(t/dt)+1;
lmb=20;
qst=235000;
qd=60000;
ee=0.3;
sgm= 5.67*10^-8;
To=2000;
q=50*10^6;
ff=0;
vv=3;
v=randi([3 vv]);
fpr=1/(dt*v);
ffff=0;
tttt=180;
NN=[1 1; 1 2; 1 3; 1 4; 1 5; 1 6; 1
7; 1 8; 1 9; 1 10; 1 11; 1 12; 1 13;
1 14; 2 14; 2 13; 2 12; 2 11; 2 10; 2
9; 2 8; 2 7; 2 6; 2 5; 2 4; 2 3; 2
2; 2 1; 3 1; 3 2; 3 3; 3 4; 3 5; 3
6; 3 7; 3 8; 3 9; 3 10; 3 11; 3 12; 3
13; 3 14; 4 14; 4 13; 4 12; 4 11; 4
10; 4 9; 4 8; 4 7; 4 6; 4 5; 4 4; 4
3; 4 2; 4 1; 5 1; 5 2; 5 3; 5 4; 5 5;
5 6; 5 7; 5 8; 5 9; 5 10; 5 11; 5 12;
5 13; 5 14; 6 14; 6 13; 6 12; 6 11; 6
10; 6 9; 6 8; 6 7; 6 6; 6 5; 6 4; 6
3; 6 2; 6 1; 7 1; 7 2; 7 3; 7 4; 7 5;
7 6; 7 7; 7 8; 7 9; 7 10; 7 11; 7 12;
7 13; 7 14 ];
tic
L1=zeros(26,26);
for www=1:13
    if www==1
        for xxx=12:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==2
        for xxx=9:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==3
        for xxx=7:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==4
        for xxx=6:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==5
        for xxx=5:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==6
        for xxx=4:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==7 | www==8
        for xxx=3:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==9 | www==10 |
www==11
        for xxx=2:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==12 | www==13
        for xxx=1:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    end
end
for www=14:26
    for xxx=1:13
        L1(xxx,www)=L1(xxx,27-www);
    end
end
for www=1:13
    for xxx=14:26
        L1(xxx,www)=L1(27-xxx,www);
    end
end
for www=14:26
    for xxx=14:26
        L1(xxx,www)=L1(27-xxx,27-
www);
    end
end
L2=zeros(13,26);
for www=1:13

```



```

        if www==1
            for xxx=12:13
                L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
            end
            elseif www==2
                for xxx=9:13
                    L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                end
            elseif www==3
                for xxx=7:13
                    L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                end
            elseif www==4
                for xxx=6:13
                    L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                end
            elseif www==5
                for xxx=5:13
                    L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                end
            elseif www==6
                for xxx=4:13
                    L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                end
            elseif www==7 | www==8
                for xxx=3:13
                    L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                end
            elseif www==9 | www==10 | www==11
                for xxx=2:13
                    L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                end
            elseif www==12 | www==13
                for xxx=1:13
                    L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                end
            end
        end
        for www=14:26
            for xxx=1:13
                L2(xxx,www)=L2(xxx,27-www);
            end
        end
        end
        L3=zeros(13,26);
        for www=1:13
            if www==1
                for xxx=12:13
                    L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                end
            elseif www==2
                for xxx=9:13
                    L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                end
            elseif www==3
                for xxx=7:13
                    L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                end
            elseif www==4
                for xxx=6:13
                    L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                end
            elseif www==5
                for xxx=5:13
                    L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                end
            elseif www==6
                for xxx=4:13
                    L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                end
            elseif www==7 | www==8
                for xxx=3:13
                    L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                end
            elseif www==9 | www==10 | www==11
                for xxx=2:13
                    L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                end
            elseif www==12 | www==13
                for xxx=1:13
                    L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                end
            end
        end
        end
        for www=14:26
            for xxx=1:13
                L3(xxx,www)=L3(xxx,27-www);
            end
        end
        end
        L3=rot90(rot90(L3));
        T=zeros(imax,jmax,kmax);
        for i=1:imax
            for j=1:jmax
                for k=1:kmax
                    T(i,j,k)=randi([1970 1980]);
                end
            end
        end
        end
        T(1:33,112:160,24:31)=300;
        TS=T;
        AI=zeros(imax,imax);
        BI=zeros(imax,1);
        DI=zeros(imax,imax);
        AI(1,1)=-lmb;
        AI(1,2)=lmb;
        AI(imax,imax-1)=lmb;
        AI(imax,imax)=-lmb;
        BI(1,1)=0;
    end
end

```



```

for i=2:(imax-1)
    AI(i,i-1)=aa*dt;
    AI(i,i)=- (dx^2+2*aa*dt);
    AI(i,i+1)=aa*dt;
    DI(i,i)=-dx^2;
end
AJ=zeros(jmax,jmax);
BJ=zeros(jmax,1);
DJ=zeros(jmax,jmax);
AJ(1,1)=-lmb;
AJ(1,2)=lmb;
AJ(jmax,jmax-1)=lmb;
AJ(jmax,jmax)=-lmb;
BJ(1,1)=qst*dy;
BJ(jmax,1)=qst*dy;
for j=2:(jmax-1)
    AJ(j,j-1)=aa*dt;
    AJ(j,j)=- (dy^2+2*aa*dt);
    AJ(j,j+1)=aa*dt;
    DJ(j,j)=-dy^2;
end

AK=zeros(kmax,kmax);
BK=zeros(kmax,1);
DK=zeros(kmax,kmax);
AK(1,1)=-lmb;
AK(1,2)=lmb;
AK(kmax,kmax-1)=lmb;
AK(kmax,kmax)=-lmb;
BK(1,1)=qd*dz;
SKK=zeros(kmax,1);
for k=2:(kmax-1)
    AK(k,k-1)=aa*dt;
    AK(k,k)=- (dz^2+2*aa*dt);
    AK(k,k+1)=aa*dt;
    DK(k,k)=-dz^2;
end
nnn=1;
TM31=zeros(imax,jmax,(fmax-1)/10);
TM25=zeros(imax,jmax,(fmax-1)/10);
TM20=zeros(imax,jmax,(fmax-1)/10);
TM15=zeros(imax,jmax,(fmax-1)/10);
TM10=zeros(imax,jmax,(fmax-1)/10);
TM5=zeros(imax,jmax,(fmax-1)/10);
for f=1:fmax
    if fix(f/10)==f/10
        TM31(:, :, f/10)=T(:, :, kmax);
        TM25(:, :, f/10)=T(:, :, 25);
        TM20(:, :, f/10)=T(:, :, 20);
        TM15(:, :, f/10)=T(:, :, 15);
        TM10(:, :, f/10)=T(:, :, 10);
        TM5(:, :, f/10)=T(:, :, 5);
    end
end
L=zeros(imax,jmax);
    if NN(nnn,1)==1
        L(NN(nnn,1)*25-
24:NN(nnn,1)*25-
12,NN(nnn,2)*25+1:NN(nnn,2)*25+26)=L3
;
        elseif NN(nnn,1)>1 &
NN(nnn,1)<7
            L(NN(nnn,1)*25-
37:NN(nnn,1)*25-

```

```

12,NN(nnn,2)*25+1:NN(nnn,2)*25+26)=L1
;
        elseif NN(nnn,1)==7
            L(NN(nnn,1)*25-
36:NN(nnn,1)*25-
24,NN(nnn,2)*25+1:NN(nnn,2)*25+26)=L2
;
            end
nnn=nnn+1;
if nnn==99
    nnn=1;
end
    for k=2:kmax-1
        for j=2:jmax-1
            SI=T(:,j,k);
            AI1=diag(AI,-1);
            AI2=diag(AI);
            AI3=diag(AI,1);
            VI=BI+DI*SI;
            AI3z=zeros(1,imax);
            VIz=zeros(1,imax);
            AI3z(1)=AI3(1)/AI2(1);
            for w=1:imax-2
                AI3z(w+1)=AI3(w+1)/(AI2(w+1)-
AI1(w)*AI3z(w));
            end
            VIz(1)=VI(1)/AI2(1);
            for w=1:imax-1
                VIz(w+1)=(VI(w+1)-
AI1(w)*VIz(w))/(AI2(w+1)-
AI1(w)*AI3z(w));
            end
            SI(imax)=VIz(imax);
            for w=imax-1:-1:1
                SI(w)=VIz(w)-AI3z(w)*SI(w+1);
            end
            T(:,j,k)=SI;
        end
    end

for i=2:imax-1
    for k=2:kmax-1
        SJ=T(i, :, k)';
        AJ1=diag(AJ,-1);
        AJ2=diag(AJ);
        AJ3=diag(AJ,1);
        VJ=BJ+DJ*SJ;
        AJ3z=zeros(1,jmax);
        VJz=zeros(1,jmax);
        AJ3z(1)=AJ3(1)/AJ2(1);
        for w=1:jmax-2
            AJ3z(w+1)=AJ3(w+1)/(AJ2(w+1)-
AJ1(w)*AJ3z(w));
        end
        VJz(1)=VJ(1)/AJ2(1);
        for w=1:jmax-1
            VJz(w+1)=(VJ(w+1)-
AJ1(w)*VJz(w))/(AJ2(w+1)-
AJ1(w)*AJ3z(w));
        end
        SJ(jmax)=VJz(jmax);
        for w=jmax-1:-1:1
            SJ(w)=VJz(w)-AJ3z(w)*SJ(w+1);
        end
    end
end

```

```

SJ=SJ';
T(i, :, k)=SJ;
    end
end

for i=1:imax
    for j=1:jmax
        SK=T(i, j, :);
        ll=L(i, j);
        if i<=13
            if j<=13
Tsr=mean(mean(T(1:26, 1:26)));
            elseif j>13

Tsr=mean(mean(T(1:26, j-13:j+13)));
                end
            elseif i>13 & i<138
                if j<=13
Tsr=mean(mean(T(i-13:i+13, 1:26)));
                    elseif j>13
                        Tsr=mean(mean(T(i-
13:i+13, j-13:j+13)));
                            end
                        elseif i>138
                            if j<=13

Tsr=mean(mean(T(139:151, 1:26)));
                                elseif j>13

Tsr=mean(mean(T(139:151, j-13:j+13)));
                                    end
                                        end
                                            Qrad=ee*sgm*dz*(Tsr^4-
300^4);

BK(kmax, 1)=-dz*ceil(ll)*q*exp(-
ka*ll^2)+(floor(1-ll))*Qrad;
                    for
x=1:kmax
                        SKK(x, 1)=SK(:, :, x);
                            end
AK1=diag(AK, -1);
AK2=diag(AK);
AK3=diag(AK, 1);
VK=BK+DK*SKK;
AK3z=zeros(1, kmax);
VKz=zeros(1, kmax);
AK3z(1)=AK3(1)/AK2(1);
for w=1:kmax-2
    AK3z(w+1)=AK3(w+1)/(AK2(w+1)-
AK1(w)*AK3z(w));
end
VKz(1)=VK(1)/AK2(1);
for w=1:kmax-1
    VKz(w+1)=(VK(w+1)-
AK1(w)*VKz(w))/(AK2(w+1)-
AK1(w)*AK3z(w));
end
SKK(kmax)=VKz(kmax);
for w=kmax-1:-1:1
    SKK(w)=VKz(w)-AK3z(w)*SKK(w+1);
end
for x=1:kmax
    SK(:, :, x)=SKK(x, 1);

```

```

end
T(i, j, :)=SK;
    end
    end
    fff=fix(ff/fpr);
        for k=2:kmax-1
            for j=2:jmax-1
                T(1, j, k)=To;
            end
            end
            if fff==1
                T1=T;
                for i=imax:-1:2
                    for k=2:kmax
                        for j=2:jmax
                            T1(i, j, k)=T(i-1, j, k);
                        end
                    end
                end
                end
                fff=0;
                T=T1;
                TS=T;
            end
            ttt=fix(ffff/tttt);
            if ttt==1
                v=randi([3 vv])
            fpr=1/(dt*v);
            ffff=0;
            ff=0;
            end
            ff=ff+1;
            ffff=ffff+1;
            f
        end
    end
    toc
    [ii, jj]=meshgrid(0:1:jmax-
1, 0:1:imax-1);
    surf(ii, jj, T(:, :, kmax))
    shading flat

```

ДОДАТОК Г. Програма моделювання обігріву проміжної ємності при використанні алгоритму В в MATLAB

```

clc
l=0.150;
dx=0.001;
imax=(l/dx)+1;
b=0.4;
dy=0.001;
jmax=(b/dy)+1;
h=0.03;
dz=0.001;
kmax=(h/dz)+1;
aa=0.000007585;
Qgrad=0;
ka=1500;
L=zeros(imax,jmax);
G=[0 112.700535324936
168.093128252061 219.689657302165
269.086893856025 317.031581578886
363.931234831992 410.034413485587
455.505285561622 500.458792467145
544.979041614258 567.973853917137
613.269141745126 657.551045594981
701.292382542289 744.665601404936
787.753648337752 830.605313346470
873.253413730652 915.722029022602
958.029869077027;
0 112.700535324936
168.093128252061 219.689657302165
269.086893856025 317.031581578886
352.321857694656 399.500785098035
445.504072523157 490.776042883308
535.508835917315 558.857149756598
604.183798959658 648.531730890770
692.343384689392 735.783344343586
748.986231557057 793.448185423924
836.957518443358 879.984424867762
922.695780842123;
0 112.700535324936
168.093128252061 219.689657302165
260.290117790519 309.429544330355
356.860284003541 393.259773139275
434.757245039420 480.721872825568
525.826792858489 549.614517763912
594.987944556321 639.415947048008
655.806906153870 701.090101017805
745.165999887701 762.574148145359
799.733938798902 843.680555286142
886.934926046744;
0 112.700535324936
168.093128252061 215.691843868730
262.540777689055 311.083702878496
345.654279186343 393.281160417141
439.505669344630 467.925384314456
513.876485854157 541.965773472888
581.905852434826 626.799280498713
643.663080231304 688.975093911173
733.129257336499 745.381285424292
789.846277192044 803.245228799961
841.106486357366;
0 112.700535324936
168.093128252061 214.216827185531
264.287757506500 303.143160694059
351.077337156280 384.569888256782
431.336982158553 460.199505986922
506.223027947670 530.817138857669
576.323074847066 596.857227787275
641.981477236105 658.591153171569
703.422017026778 716.205403542419
760.803175789727 769.839606590863
814.246593340120;
0 112.700535324936
165.421115093547 215.205531760820
256.559344658823 305.753943661389
342.052073273857 378.156020809082
421.612055468974 449.868299052572
496.355246890583 521.272919392773
546.932376281630 588.551017401949
606.525086835881 652.010813037767
667.034675696197 683.284839025806
723.932442146139 732.430751621448
777.391038394054];
t=25;
dt=1/30;
fmax=(t/dt)+1;
lmb=20;
qst=235000;
qd=60000;
ee=0.3;
sgm= 5.67*10^-8;
To=2000;
Tsr=zeros((imax-1)/25,(jmax-51)/25);
q=50*10^6;
ff=0;
vv=3;
v=randi([3 vv]);
fpr=1/(dt*v);
ffff=0;
llll=60;
tt=60;
tttt=180;
tic
T=zeros(imax,jmax,kmax);
for i=1:imax
    for j=1:jmax
        for k=1:kmax
            T(i,j,k)=randi([1970
1980]);
        end
    end
end
TS=T;
AI=zeros(imax,imax);
BI=zeros(imax,1);
DI=zeros(imax,imax);

```



```

        for
jjjj=NN(nnn,3)*25+1:NN(nnn,3)*25+26
            xxx=xxx+1;
            if xxx==14
                xxx=15;
            end
            L(iiii,jjjj)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
        xxx=0;
    end
    for k=2:kmax-1
    for j=2:jmax-1
        SI=T(:,j,k);
        AI1=diag(AI,-1);
        AI2=diag(AI);
        AI3=diag(AI,1);
        VI=BI+DI*SI;
        AI3z=zeros(1,imax);
        VIZ=zeros(1,imax);
        AI3z(1)=AI3(1)/AI2(1);
        for w=1:imax-2
            AI3z(w+1)=AI3(w+1)/(AI2(w+1)-
AI1(w)*AI3z(w));
        end
        VIZ(1)=VI(1)/AI2(1);
        for w=1:imax-1
            VIZ(w+1)=(VI(w+1)-
AI1(w)*VIZ(w))/(AI2(w+1)-
AI1(w)*AI3z(w));
        end
        SI(imax)=VIZ(imax);
        for w=imax-1:-1:1
            SI(w)=VIZ(w)-AI3z(w)*SI(w+1);
        end
        T(:,j,k)=SI;
    end
    end
    for i=2:imax-1
        for k=2:kmax-1
            SJ=T(i,: ,k)';
            AJ1=diag(AJ,-1);
        AJ2=diag(AJ);
        AJ3=diag(AJ,1);
        VJ=BJ+DJ*SJ;
        AJ3z=zeros(1,jmax);
        VJz=zeros(1,kmax);
        AJ3z(1)=AJ3(1)/AJ2(1);
        for w=1:jmax-2
            AJ3z(w+1)=AJ3(w+1)/(AJ2(w+1)-
AJ1(w)*AJ3z(w));
        end
        VJz(1)=VJ(1)/AJ2(1);
        for w=1:jmax-1
            VJz(w+1)=(VJ(w+1)-
AJ1(w)*VJz(w))/(AJ2(w+1)-
AJ1(w)*AJ3z(w));
        end
        SJ(jmax)=VJz(jmax);
        for w=jmax-1:-1:1
            SJ(w)=VJz(w)-AJ3z(w)*SJ(w+1);
        end
        SJ=SJ';
        T(i,: ,k)=SJ;
    end
end
end
    for i=1:imax
        for j=1:jmax
            SK=T(i,j,:);
            ll=L(i,j);
            if i<=13
                if j<=13
                    Tsr=mean(mean(T(1:26,1:26)));
                elseif j>13
                    Tsr=mean(mean(T(1:26,j-13:j+13)));
                end
            elseif i>13 & i<138
                if j<=13
                    Tsr=mean(mean(T(i-13:i+13,1:26)));
                elseif j>13
                    Tsr=mean(mean(T(i-
13:i+13,j-13:j+13)));
                end
            elseif i>138
                if j<=13
                    Tsr=mean(mean(T(139:151,1:26)));
                elseif j>13
                    Tsr=mean(mean(T(139:151,j-13:j+13)));
                end
            end
            Qrad=ee*sgm*dz*(Tsr^4-
300^4);
            BK(kmax,1)=-dz*ceil(ll)*q*exp(-
ka*ll^2)+(floor(1-ll))*Qrad;
        end
        for
x=1:kmax
            SKK(x,1)=SK(:, :, x);
        end
        AK1=diag(AK,-1);
        AK2=diag(AK);
        AK3=diag(AK,1);
        VK=BK+DK*SKK;
        AK3z=zeros(1,kmax);
        VKz=zeros(1,kmax);
        AK3z(1)=AK3(1)/AK2(1);
        for w=1:kmax-2
            AK3z(w+1)=AK3(w+1)/(AK2(w+1)-
AK1(w)*AK3z(w));
        end
        VKz(1)=VK(1)/AK2(1);
        for w=1:kmax-1
            VKz(w+1)=(VK(w+1)-
AK1(w)*VKz(w))/(AK2(w+1)-
AK1(w)*AK3z(w));
        end
        SKK(kmax)=VKz(kmax);
        for w=kmax-1:-1:1
            SKK(w)=VKz(w)-AK3z(w)*SKK(w+1);
        end
        for x=1:kmax
            SK(:, :, x)=SKK(x,1);
        end
    end
end

```

```

    end
    T(i,j,:)=SK;
    end
    end

    fff=fix(ff/fpr);
    for k=2:kmax-1
    for j=2:jmax-1
    T(1,j,k)=To;
    end
    end
    if fff==1
    T1=T;

    for i=imax:-1:2
for k=2:kmax
for j=2:jmax
T1(i,j,k)=T(i-1,j,k);
end
end
end
    ff=0;

T=T1;
TS=T;
end
ttt=fix(ffff/tttt);
if ttt==1
v=randi([3 vv])
fpr=1/(dt*v);
ffff=0;
ff=0;
end
ff=ff+1;
ffff=ffff+1;
tt=tt+1;
tttt=tttt+1;
f
end
toc
[ii,jj]=meshgrid(0:1:jmax-
1,0:1:imax-1);
surf(ii,jj,T(:,:,kmax))
shading flat

```

ДОДАТОК Г. Програма моделювання обігріву проміжної ємності при роботі алгоритму С в MATLAB

```

clc
l=0.150;
dx=0.001;
imax=(l/dx)+1;
b=0.4;
dy=0.001;
jmax=(b/dy)+1;
h=0.03;
dz=0.001;
kmax=(h/dz)+1;
aa=0.000007585;
Qrad=0;
ka=1500;
L=zeros(imax,jmax);
G=[0 112.700535324936
168.093128252061 219.689657302165
269.086893856025 317.031581578886
363.931234831992 410.034413485587
455.505285561622 500.458792467145
544.979041614258 567.973853917137
613.269141745126 657.551045594981
701.292382542289 744.665601404936
787.753648337752 830.605313346470
873.253413730652 915.722029022602
958.029869077027;
0 112.700535324936
168.093128252061 219.689657302165
269.086893856025 317.031581578886
352.321857694656 399.500785098035
445.504072523157 490.776042883308
535.508835917315 558.857149756598
604.183798959658 648.531730890770
692.343384689392 735.783344343586
748.986231557057 793.448185423924
836.957518443358 879.984424867762
922.695780842123;
0 112.700535324936
168.093128252061 219.689657302165
260.290117790519 309.429544330355
356.860284003541 393.259773139275
434.757245039420 480.721872825568
525.826792858489 549.614517763912
594.987944556321 639.415947048008
655.806906153870 701.090101017805
745.165999887701 762.574148145359
799.733938798902 843.680555286142
886.934926046744;
0 112.700535324936
168.093128252061 215.691843868730
262.540777689055 311.083702878496
345.654279186343 393.281160417141
439.505669344630 467.925384314456
513.876485854157 541.965773472888
581.905852434826 626.799280498713
643.663080231304 688.975093911173
733.129257336499 745.381285424292
789.846277192044 803.245228799961
841.106486357366;
0 112.700535324936
168.093128252061 214.216827185531
264.287757506500 303.143160694059
351.077337156280 384.569888256782
431.336982158553 460.199505986922
506.223027947670 530.817138857669
576.323074847066 596.857227787275
641.981477236105 658.591153171569
703.422017026778 716.205403542419
760.803175789727 769.839606590863
814.246593340120;
0 112.700535324936
165.421115093547 215.205531760820
256.559344658823 305.753943661389
342.052073273857 378.156020809082
421.612055468974 449.868299052572
496.355246890583 521.272919392773
546.932376281630 588.551017401949
606.525086835881 652.010813037767
667.034675696197 683.284839025806
723.932442146139 732.430751621448
777.391038394054];
t=40;
dt=1/30;
fmax=(t/dt)+1;
lmb=20;
qst=235000;
qd=60000;
ee=0.3;
sgm= 5.67*10^-8;
To=2000;
Tsr=zeros((imax-1)/25,(jmax-51)/25);
q=50*10^6;
ff=0;
vv=3;
v=randi([3 vv]);
fpr=1/(dt*v);
ffff=0;
l111=60;
tt=60;
tttt=180;
tic
L1=zeros(26,26);
for www=1:13
    if www==1
        for xxx=12:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==2
        for xxx=9:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==3
        for xxx=7:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==4
        for xxx=6:13

```

```

        L1(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
    end
    elseif www==5
        for xxx=5:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==6
        for xxx=4:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==7 | www==8
        for xxx=3:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==9 | www==10 | www==11
        for xxx=2:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==12 | www==13
        for xxx=1:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    end
end
for www=14:26
    for xxx=1:13
        L1(xxx,www)=L1(xxx,27-www);
    end
end
for www=1:13
    for xxx=14:26
        L1(xxx,www)=L1(27-xxx,www);
    end
end
for www=14:26
    for xxx=14:26
        L1(xxx,www)=L1(27-xxx,27-www);
    end
end
end
L2=zeros(13,26);
for www=1:13
    if www==1
        for xxx=12:13
            L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==2
        for xxx=9:13
            L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==3
        for xxx=7:13
            L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    end
end

```

```

    elseif www==4
        for xxx=6:13
            L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==5
        for xxx=5:13
            L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==6
        for xxx=4:13
            L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==7 | www==8
        for xxx=3:13
            L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==9 | www==10 | www==11
        for xxx=2:13
            L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==12 | www==13
        for xxx=1:13
            L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    end
end
for www=14:26
    for xxx=1:13
        L2(xxx,www)=L2(xxx,27-www);
    end
end
L3=zeros(13,26);
for www=1:13
    if www==1
        for xxx=12:13
            L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==2
        for xxx=9:13
            L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==3
        for xxx=7:13
            L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==4
        for xxx=6:13
            L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==5
        for xxx=5:13
            L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    end
end

```



```

        end
    elseif www==6
        for xxx=4:13
            L3(www,xxx)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==7 | www==8
        for xxx=3:13
            L3(www,xxx)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==9 | www==10 |
www==11
        for xxx=2:13
            L3(www,xxx)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    elseif www==12 | www==13
        for xxx=1:13
            L3(www,xxx)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
    end
end
for www=14:26
    for xxx=1:13
        L3(xxx,www)=L3(xxx,27-www);
    end
end
L3=rot90(rot90(L3));
T=zeros(imax,jmax,kmax);
for i=1:imax
    for j=1:jmax
        for k=1:kmax
            T(i,j,k)=randi([1970
1980]);
        end
    end
end
T(1:33,112:160,24:31)=300;
TS=T;

AI=zeros(imax,imax);
BI=zeros(imax,1);
DI=zeros(imax,imax);
AI(1,1)=-lmb;
AI(1,2)=lmb;
AI(imax,imax-1)=lmb;
AI(imax,imax)=-lmb;
BI(1,1)=0;
for i=2:(imax-1)
    AI(i,i-1)=aa*dt;
    AI(i,i)=- (dx^2+2*aa*dt);
    AI(i,i+1)=aa*dt;
    DI(i,i)=-dx^2;
end

AJ=zeros(jmax,jmax);
BJ=zeros(jmax,1);
DJ=zeros(jmax,jmax);
AJ(1,1)=-lmb;
AJ(1,2)=lmb;
AJ(jmax,jmax-1)=lmb;
AJ(jmax,jmax)=-lmb;

```

```

BJ(1,1)=qst*dy;
BJ(jmax,1)=qst*dy;
for j=2:(jmax-1)
    AJ(j,j-1)=aa*dt;
    AJ(j,j)=- (dy^2+2*aa*dt);
    AJ(j,j+1)=aa*dt;
    DJ(j,j)=-dy^2;
end

AK=zeros(kmax,kmax);
BK=zeros(kmax,1);
DK=zeros(kmax,kmax);
AK(1,1)=-lmb;
AK(1,2)=lmb;
AK(kmax,kmax-1)=lmb;
AK(kmax,kmax)=-lmb;
BK(1,1)=qd*dz;
SKK=zeros(kmax,1);
for k=2:(kmax-1)
    AK(k,k-1)=aa*dt;
    AK(k,k)=- (dz^2+2*aa*dt);
    AK(k,k+1)=aa*dt;
    DK(k,k)=-dz^2;
end

TM31=zeros(imax,jmax,(fmax-1)/10);
TM25=zeros(imax,jmax,(fmax-1)/10);
TM20=zeros(imax,jmax,(fmax-1)/10);
TM15=zeros(imax,jmax,(fmax-1)/10);
TM10=zeros(imax,jmax,(fmax-1)/10);
TM5=zeros(imax,jmax,(fmax-1)/10);
for f=1:fmax
    if fix(f/10)==f/10
        TM31(:,:,f/10)=T(:,:,kmax);
        TM25(:,:,f/10)=T(:,:,25);
        TM20(:,:,f/10)=T(:,:,20);
        TM15(:,:,f/10)=T(:,:,15);
        TM10(:,:,f/10)=T(:,:,10);
        TM5(:,:,f/10)=T(:,:,5);
    end
    ti=fix(tt/1111);

    L=zeros(imax,jmax);
    if ti==1

        Tkmax=T(:,:,kmax);
        NN=zeros(12,3);
        for i=1:25:126
            for j=26:25:351
                Tsr(ceil(i/25),(j-
1)/25)=mean(mean(Tkmax(i:i+24,
j:(j+24))));
            end
        end
        Tkoor=zeros((((imax-1)/25)*((jmax-
51)/25)),3);
        N=12;
        p=0;
        for iii=1:25:imax-25
            for jjj=26:25:jmax-50
                p=p+1;

                Tkoor(p,1:3)=[Tsr(ceil(iii/25),(jjj-
1)/25),ceil(iii/25),(jjj-1)/25];
            end
        end
    end
end

```

```

end
    sort=-sortrows(-Tkoor,1);
    sort=flipud(-sortrows(-
Tkoor,1));
        NN= sort(1:12,2:3);
        tt=0;
        ttttt=1;
        nnn=1;
end
if NN(nnn,1)>1 & NN(nnn,1)<7
    if ttttt==1
        L(NN(nnn,1)*25-
24:NN(nnn,1)*25+1,NN(nnn,2)*25+1:NN(n
nn,2)*25+26)=L1;
        elseif ttttt==2
            L(NN(nnn,1)*25-37:NN(nnn,1)*25-
12,NN(nnn,2)*25-
11:NN(nnn,2)*25+14)=L1;
        elseif ttttt==3
            L(NN(nnn,1)*25-37:NN(nnn,1)*25-
12,NN(nnn,2)*25+15:NN(nnn,2)*25+40)=L
1;
        elseif ttttt==4
            L(NN(nnn,1)*25-
11:NN(nnn,1)*25+14,NN(nnn,2)*25-
11:NN(nnn,2)*25+14)=L1;
        elseif ttttt==5
            L(NN(nnn,1)*25-
11:NN(nnn,1)*25+14,NN(nnn,2)*25+15:NN
(nnn,2)*25+40)=L1;
        end
    elseif NN(nnn,1)==1
        if ttttt==1
            L(NN(nnn,1)*25-
24:NN(nnn,1)*25+1,NN(nnn,2)*25+1:NN(n
nn,2)*25+26)=L1;
        elseif ttttt==2
            L(NN(nnn,1)*25-24:NN(nnn,1)*25-
12,NN(nnn,2)*25-
12:NN(nnn,2)*25+13)=L3;
        elseif ttttt==3
            L(NN(nnn,1)*25-
24:NN(nnn,1)*25-
12,NN(nnn,2)*25+14:NN(nnn,2)*25+39)=L
3;
        elseif ttttt==4
            L(NN(nnn,1)*25-
11:NN(nnn,1)*25+14,NN(nnn,2)*25-
12:NN(nnn,2)*25+13)=L1;
        elseif ttttt==5
            L(NN(nnn,1)*25-
11:NN(nnn,1)*25+14,NN(nnn,2)*25+14:NN
(nnn,2)*25+39)=L1;
        end
    elseif NN(nnn,1)==7
        if ttttt==1
            L(NN(nnn,1)*25-
24:NN(nnn,1)*25+1,NN(nnn,2)*25+1:NN(n
nn,2)*25+26)=L1;
        elseif ttttt==2
            L(NN(nnn,1)*25-
37:NN(nnn,1)*25-12,NN(nnn,2)*25-
11:NN(nnn,2)*25+14)=L1;
        elseif ttttt==3
            L(NN(nnn,1)*25-
37:NN(nnn,1)*25-
12,NN(nnn,2)*25+15:NN(nnn,2)*25+40)=L
1;
        elseif ttttt==4
            L(NN(nnn,1)*25-
11:NN(nnn,1)*25+1,NN(nnn,2)*25-
11:NN(nnn,2)*25+14)=L2;
        elseif ttttt==5
            L(NN(nnn,1)*25-
11:NN(nnn,1)*25+1,NN(nnn,2)*25+15:NN(
nnn,2)*25+40)=L2;
        end
    end
    if ttttt==5
        nnn=nnn+1;
        ttttt=0;
    end

    for k=2:kmax-1
    for j=2:jmax-1
        SI=T(:,j,k);
        AI1=diag(AI,-1);
        AI2=diag(AI);
        AI3=diag(AI,1);
        VI=BI+DI*SI;
        AI3z=zeros(1,imax);
        VIz=zeros(1,imax);
        AI3z(1)=AI3(1)/AI2(1);
        for w=1:imax-2
            AI3z(w+1)=AI3(w+1)/(AI2(w+1)-
AI1(w)*AI3z(w));
        end
        VIz(1)=VI(1)/AI2(1);
        for w=1:imax-1
            VIz(w+1)=(VI(w+1)-
AI1(w)*VIz(w))/(AI2(w+1)-
AI1(w)*AI3z(w));
        end
        SI(imax)=VIz(imax);
        for w=imax-1:-1:1
            SI(w)=VIz(w)-AI3z(w)*SI(w+1);
        end
        T(:,j,k)=SI;
    end
end

    for i=2:imax-1
        for k=2:kmax-1
            SJ=T(i,:,k)';
            AJ1=diag(AJ,-1);
            AJ2=diag(AJ);
            AJ3=diag(AJ,1);
            VJ=BJ+DJ*SJ;
            AJ3z=zeros(1,jmax);
            VJz=zeros(1,jmax);
            AJ3z(1)=AJ3(1)/AJ2(1);
            for w=1:jmax-2
                AJ3z(w+1)=AJ3(w+1)/(AJ2(w+1)-
AJ1(w)*AJ3z(w));
            end
            VJz(1)=VJ(1)/AJ2(1);
            for w=1:jmax-1

```

```

    VJz(w+1)=(VJ(w+1)-
AJ1(w)*VJz(w))/(AJ2(w+1)-
AJ1(w)*AJ3z(w));
end
SJ(jmax)=VJz(jmax);
for w=jmax-1:-1:1
    SJ(w)=VJz(w)-AJ3z(w)*SJ(w+1);
end
SJ=SJ';
T(i,:,k)=SJ;
end

for i=1:imax
    for j=1:jmax
        SK=T(i,j,:);
        ll=L(i,j);
        if i<=13
            if j<=13

Tsr=mean(mean(T(1:26,1:26)));
                elseif j>13

Tsr=mean(mean(T(1:26,j-13:j+13)));
                end
            elseif i>13 & i<138
                if j<=13
Tsr=mean(mean(T(i-13:i+13,1:26)));
                    elseif j>13
Tsr=mean(mean(T(i-
13:i+13,j-13:j+13)));
                    end
                elseif i>138
                    if j<=13

Tsr=mean(mean(T(139:151,1:26)));
                elseif j>13

Tsr=mean(mean(T(139:151,j-13:j+13)));
                end
            end
            Qrad=ee*sgm*dz*(Tsr^4-
300^4);

BK(kmax,1)=-dz*ceil(ll)*q*exp(-
ka*ll^2)+(floor(1-ll))*Qrad;
                for
x=1:kmax
                    SKK(x,1)=SK(:, :, x);
                end

AK1=diag(AK,-1);
AK2=diag(AK);
AK3=diag(AK,1);
VK=BK+DK*SKK;
AK3z=zeros(1,kmax);
VKz=zeros(1,kmax);
AK3z(1)=AK3(1)/AK2(1);

```

```

for w=1:kmax-2
    AK3z(w+1)=AK3(w+1)/(AK2(w+1)-
AK1(w)*AK3z(w));
end
VKz(1)=VK(1)/AK2(1);
for w=1:kmax-1
    VKz(w+1)=(VK(w+1)-
AK1(w)*VKz(w))/(AK2(w+1)-
AK1(w)*AK3z(w));
end
SKK(kmax)=VKz(kmax);
for w=kmax-1:-1:1
    SKK(w)=VKz(w)-AK3z(w)*SKK(w+1);
end
for x=1:kmax
    SK(:, :, x)=SKK(x,1);
end
T(i,j,:)=SK;
end
end
                fff=fix(ff/fpr);
                for k=2:kmax-1
for j=2:jmax-1
                    T(1,j,k)=To;
                end
            end
            if fff==1
T1=T;

                for i=imax:-1:2
for k=2:kmax
                    for j=2:jmax
T1(i,j,k)=T(i-1,j,k);
                    end
                end
            end
                end
                ff=0;
                T=T1;
                TS=T;
            end
            ttt=fix(ffff/tttt);
            if ttt==1
                v=randi([3 vv])
fpr=1/(dt*v);
ffff=0;
ff=0;
            end
                ff=ff+1;
                ffff=ffff+1;
                tt=tt+1;
                ttttt=ttttt+1;
                f
            end
            toc
            [ii,jj]=meshgrid(0:1:jmax-
1,0:1:imax-1);
            surf(ii,jj,T(:, :, kmax))
            shading flat

```

ДОДАТОК Д. Програма моделювання обігріву проміжної ємності при використанні алгоритму D в MATLAB

```

clc
l=0.150;
dx=0.001;
imax=(l/dx)+1;
b=0.4;
dy=0.001;
jmax=(b/dy)+1;
h=0.03;
dz=0.001;
kmax=(h/dz)+1;
aa=0.000007585;
ka=1500;
L=zeros(imax,jmax);
t=25;
dt=1/30;
fmax=(t/dt)+1;
lmb=20;
qst=235000;
qd=60000;
ee=0.3;
sgm= 5.67*10^-8;
To=2000;
q=50*10^6;
ff=0;
vv=3;
v=randi([3 vv]);
fpr=1/(dt*v);
ffff=0;
l111=60;
tt=60;
tttt=180;
NN=[1 1; 1 2; 1 3; 1 4; 1 5; 1 6; 1
7; 1 8; 1 9; 1 10; 1 11; 1 12; 1 13;
1 14; 2 14; 2 13; 2 12; 2 11; 2 10;
2 9; 2 8; 2 7; 2 6; 2 5; 2 4; 2
3; 2 2; 2 1; 3 1; 3 2; 3 3; 3 4; 3
5; 3 6; 3 7; 3 8; 3 9; 3 10; 3 11; 3
12; 3 13; 3 14; 4 14; 4 13; 4 12; 4
11; 4 10; 4 9; 4 8; 4 7; 4 6; 4 5; 4
4; 4 3; 4 2; 4 1; 5 1; 5 2; 5 3; 5
4; 5 5; 5 6; 5 7; 5 8; 5 9; 5 10; 5
11; 5 12; 5 13; 5 14; 6 14; 6 13; 6
12; 6 11; 6 10; 6 9; 6 8; 6 7; 6 6;
6 5; 6 4; 6 3; 6 2; 6 1; 7 1; 7 2; 7
3; 7 4; 7 5; 7 6; 7 7; 7 8; 7 9; 7
10; 7 11; 7 12; 7 13; 7 14; 8 14; 8
13; 8 12; 8 11; 8 10; 8 9; 8 8; 8 7;
8 6; 8 5; 8 4; 8 3; 8 2; 8 1 ];
tic
T=zeros(imax,jmax,kmax);
for i=1:imax
    for j=1:jmax
        for k=1:kmax
            T(i,j,k)=randi([1970
1980]);
        end
    end
end

TS=T;
AI=zeros(imax,imax);
BI=zeros(imax,1);
DI=zeros(imax,imax);
AI(1,1)=-lmb;
AI(1,2)=lmb;
AI(imax,imax-1)=lmb;
AI(imax,imax)=-lmb;
BI(1,1)=0;
for i=2:(imax-1)
    AI(i,i-1)=aa*dt;
    AI(i,i)=- (dx^2+2*aa*dt);
    AI(i,i+1)=aa*dt;
    DI(i,i)=-dx^2;
end
AJ=zeros(jmax,jmax);
BJ=zeros(jmax,1);
DJ=zeros(jmax,jmax);
AJ(1,1)=-lmb;
AJ(1,2)=lmb;
AJ(jmax,jmax-1)=lmb;
AJ(jmax,jmax)=-lmb;
BJ(1,1)=qst*dy;
BJ(jmax,1)=qst*dy;
for j=2:(jmax-1)
    AJ(j,j-1)=aa*dt;
    AJ(j,j)=- (dy^2+2*aa*dt);
    AJ(j,j+1)=aa*dt;
    DJ(j,j)=-dy^2;
end
AK=zeros(kmax,kmax);
BK=zeros(kmax,1);
DK=zeros(kmax,kmax);
AK(1,1)=-lmb;
AK(1,2)=lmb;
AK(kmax,kmax-1)=lmb;
AK(kmax,kmax)=-lmb;
BK(1,1)=qd*dz;
SKK=zeros(kmax,1);
for k=2:(kmax-1)
    AK(k,k-1)=aa*dt;
    AK(k,k)=- (dz^2+2*aa*dt);
    AK(k,k+1)=aa*dt;
    DK(k,k)=-dz^2;
end
nnn=1;
TM31=zeros(imax,jmax,(fmax-1)/10);
TM25=zeros(imax,jmax,(fmax-1)/10);
TM20=zeros(imax,jmax,(fmax-1)/10);
TM15=zeros(imax,jmax,(fmax-1)/10);
TM10=zeros(imax,jmax,(fmax-1)/10);
TM5=zeros(imax,jmax,(fmax-1)/10);
for f=1:fmax
    if fix(f/10)==f/10
        TM31(:,:,f/10)=T(:,:,kmax);
        TM25(:,:,f/10)=T(:,:,25);
        TM20(:,:,f/10)=T(:,:,20);
        TM15(:,:,f/10)=T(:,:,15);
        TM10(:,:,f/10)=T(:,:,10);
    end
end

```

```

TM5(:, :, f/10)=T(:, :, 5);
end
L=zeros(imax, jmax);
ti=fix(tt/1111);

if ti==1
    Tkmax=T(:, :, kmax);
    for i=1:25:126
        for j=26:25:351
            Tsr(ceil(i/25), (j-1)/25)=mean(mean(Tkmax(i:i+24, j:(j+24))));
        end
    end
    Tkoor=zeros(((imax-1)/25)*((jmax-51)/25), 3);
    p=0;
    for iii=1:25:imax-25
        for jjj=26:25:jmax-50
            p=p+1;

            Tkoor(p, 1:3)=[Tsr(ceil(iii/25), (jjj-1)/25), ceil(iii/25), (jjj-1)/25];
        end
    end
    sort=-sortrows(-Tkoor, 1);
    sort=flipud(-sortrows(-Tkoor, 1))

    tt=0;
    ttttt=0;
    sss=1;
    NNN= sort(1:12, 2:3);
end
if sort(sss, 1)>1950
    if NN(nnn, 1)==1
        www=15;
        xxx=0;
        for
            iii=NN(nnn, 1)*25-24:NN(nnn, 1)*25-12
                www=www+1;
                for
                    jjjj=NN(nnn, 2)*25+1:NN(nnn, 2)*25+26
                        xxx=xxx+1;
                        if xxx==14
                            xxx=15;
                        end
                    end
                    L(iiii, jjjj)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                end
                xxx=0;
            end
        end
    elseif NN(nnn, 1)==2
        www=0;
        xxx=0;
        for
            iii=NN(nnn, 1)*25-49:NN(nnn, 1)*25-24
                www=www+1;
                if www==14
                    www=15;
                end
            end
        end
        for
            jjjj=NN(nnn, 2)*25+1:NN(nnn, 2)*25+26
                www=www+1;
                if www==14
                    www=15;
                end
            end
        end
    end
elseif NN(nnn, 1)>2 & NN(nnn, 1)<8
    www=0;
    xxx=0;
    for
        iii=NN(nnn, 1)*25-48:NN(nnn, 1)*25-24
            www=www+1;
            if www==14
                www=15;
            end
        end
    end
elseif NN(nnn, 1)==8
    www=0;
    xxx=0;
    for
        iii=NN(nnn, 1)*25-60:NN(nnn, 1)*25-49
            www=www+1;
            if www==14
                www=15;
            end
        end
    end
elseif NN(nnn, 2)*25+1:NN(nnn, 2)*25+26
    xxx=xxx+1;
    if xxx==14
        xxx=15;
    end
    L(iiii, jjjj)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
end
end
elseif sort(sss, 1)<1950 &
    ttttt==0
    ttttt=1;
    end
    if NNN(sss, 1)>1 &
        NNN(sss, 1)<7
        if ttttt==1
            www=0;
            xxx=0;
            for
                iii=NNN(sss, 1)*25-24:NNN(sss, 1)*25+1
                    www=www+1;
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        if www==14
            www=15;
        end
        for
            jjjj=NNN(sss,2)*25+1:NNN(sss,2)*25+2
            6
                xxx=xxx+1;
                if xxx==14
                    xxx=15;
                end
                L(iiii,jjjj)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                end
                xxx=0;
            end
        elseif ttttt==2
            www=0;
                xxx=0;
                for
                    iiii=NNN(sss,1)*25-37:NNN(sss,1)*25-
12
                        www=www+1;
                        if www==14
                            www=15;
                        end
                        for
                            jjjj=NNN(sss,2)*25-
11:NNN(sss,2)*25+14
                                xxx=xxx+1;
                                if xxx==14
                                    xxx=15;
                                end
                                L(iiii,jjjj)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                                end
                                xxx=0;
                            end
                        elseif ttttt==3
                            www=0;
                                xxx=0;
                                for
                                    iiii=NNN(sss,1)*25-37:NNN(sss,1)*25-
12
                                        www=www+1;
                                        if www==14
                                            www=15;
                                        end
                                        for
                                            jjjj=NNN(sss,2)*25+15:NNN(sss,2)*25+
40
                                                xxx=xxx+1;
                                                if xxx==14
                                                    xxx=15;
                                                end
                                                L(iiii,jjjj)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                                                end
                                                xxx=0;
                                            end
                                        end
                                    elseif NNN(sss,1)==1
                                        if ttttt==1
                                            www=0;
                                                xxx=0;
                                                for
                                                    iiii=NNN(sss,1)*25-
24:NNN(sss,1)*25+1
                                                        www=www+1;
                                                        if www==14
                                                            www=15;
                                                        end
                                                    end
                                                for
                                                    jjjj=NNN(sss,2)*25+1:NNN(sss,2)*25+2
6
                                                        xxx=xxx+1;
                                                        if xxx==14
                                                            xxx=15;
                                                        end
                                                        L(iiii,jjjj)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                                                        end
                                                        xxx=0;
                                                    end
                                                elseif ttttt==4
                                                    www=0;
                                                        xxx=0;

```

```

        for
            iiii=NNN(sss,1)*25-
11:NNN(sss,1)*25+14
                www=www+1;
                if www==14
                    www=15;
                end
                for jjjj=NNN(sss,2)*25-
11:NNN(sss,2)*25+14
                    xxx=xxx+1;
                    if xxx==14
                        xxx=15;
                    end
                    L(iiii,jjjj)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                    end
                    xxx=0;
                end
            elseif ttttt==5
                www=0;
                    xxx=0;
                    for
                        iiii=NNN(sss,1)*25-
11:NNN(sss,1)*25+14
                            www=www+1;
                            if www==14
                                www=15;
                            end
                            for
                                jjjj=NNN(sss,2)*25+15:NNN(sss,2)*25+
40
                                    xxx=xxx+1;
                                    if xxx==14
                                        xxx=15;
                                    end
                                    L(iiii,jjjj)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                                    end
                                    xxx=0;
                                end
                            end
                        elseif NNN(sss,1)==1
                            if ttttt==1
                                www=0;
                                    xxx=0;
                                    for
                                        iiii=NNN(sss,1)*25-
24:NNN(sss,1)*25+1
                                            www=www+1;
                                            if www==14
                                                www=15;
                                            end
                                        end
                                    for
                                        jjjj=NNN(sss,2)*25+1:NNN(sss,2)*25+2
6
                                            xxx=xxx+1;
                                            if xxx==14
                                                xxx=15;
                                            end
                                            L(iiii,jjjj)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                                            end
                                            xxx=0;
                                        end
                                    elseif ttttt==4
                                        www=0;
                                            xxx=0;

```

```

        end
    elseif ttttt==2
        www=15;
        xxx=0;
        for
            iiii=NNN(sss,1)*25-24:NNN(sss,1)*25-12
                www=www+1;
                for
                    jjjj=NNN(sss,2)*25-12:NNN(sss,2)*25+13
                        xxx=xxx+1;
                        if xxx==14
                            xxx=15;
                        end
                        L(iiii,jjjj)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                    end
                    xxx=0;
                end
            end
        elseif ttttt==3
            www=15;
            xxx=0;
            for
                iiii=NNN(sss,1)*25-24:NNN(sss,1)*25-12
                    www=www+1;
                    for
                        jjjj=NNN(sss,2)*25+14:NNN(sss,2)*25+39
                            xxx=xxx+1;
                            if xxx==14
                                xxx=15;
                            end
                            L(iiii,jjjj)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                        end
                        xxx=0;
                    end
                end
            end
        elseif ttttt==4
            www=0;
            xxx=0;
            for
                iiii=NNN(sss,1)*25-11:NNN(sss,1)*25+14
                    www=www+1;
                    if www==14
                        www=15;
                    end
                    for jjjj=NNN(sss,2)*25-12:NNN(sss,2)*25+14
                        xxx=xxx+1;
                        if xxx==14
                            xxx=15;
                        end
                        L(iiii,jjjj)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                    end
                    xxx=0;
                end
            end
        elseif ttttt==5
            www=0;
            xxx=0;

```

```

        for
            iiii=NNN(sss,1)*25-11:NNN(sss,1)*25+14
                www=www+1;
                if www==14
                    www=15;
                end
                for
                    jjjj=NNN(sss,2)*25+14:NNN(sss,2)*25+39
                        xxx=xxx+1;
                        if xxx==14
                            xxx=15;
                        end
                        L(iiii,jjjj)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                    end
                    xxx=0;
                end
            end
        elseif NNN(sss,1)==7
            if ttttt==1
                www=0;
                xxx=0;
                for
                    iiii=NNN(sss,1)*25-24:NNN(sss,1)*25+1
                        www=www+1;
                        if www==14
                            www=15;
                        end
                    end
                for
                    jjjj=NNN(sss,2)*25+1:NNN(sss,2)*25+26
                        xxx=xxx+1;
                        if xxx==14
                            xxx=15;
                        end
                        L(iiii,jjjj)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                    end
                    xxx=0;
                end
            end
        elseif ttttt==2
            www=0;
            xxx=0;
            for
                iiii=NNN(sss,1)*25-37:NNN(sss,1)*25-12
                    www=www+1;
                    if www==14
                        www=15;
                    end
                    for
                        jjjj=NNN(sss,2)*25-11:NNN(sss,2)*25+14
                            xxx=xxx+1;
                            if xxx==14
                                xxx=15;
                            end
                            L(iiii,jjjj)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end

```

```

xxx=0;
end
elseif ttttt==3
    www=0;
    xxx=0;
    for
iiii=NNN(sss,1)*25-37:NNN(sss,1)*25-
12
        www=www+1;
        if www==14
            www=15;
        end
        for
jjjj=NNN(sss,2)*25+15:NNN(sss,2)*25+
40
            xxx=xxx+1;
            if xxx==14
                xxx=15;
            end
            L(iiii,jjjj)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
        end
        xxx=0;
    end
    elseif ttttt==4
        www=0;
        xxx=0;
        for
iiii=NNN(sss,1)*25-
11:NNN(sss,1)*25+1
            www=www+1;
            if www==14
                www=15;
            end
            for jjjj=NNN(sss,2)*25-
11:NNN(sss,2)*25+14
                xxx=xxx+1;
                if xxx==14
                    xxx=15;
                end
                L(iiii,jjjj)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
            end
            xxx=0;
        end
    elseif ttttt==5
        www=0;
        xxx=0;
        for
iiii=NNN(sss,1)*25-
11:NNN(sss,1)*25+1
            www=www+1;
            if www==14
                www=15;
            end
            for
jjjj=NNN(sss,2)*25+15:NNN(sss,2)*25+
40
                xxx=xxx+1;
                if xxx==14
                    xxx=15;
                end
            end
        end
    end
end

```

```

L(iiii,jjjj)=sqrt(((www-
14)/1000)^2+((xxx-14)/1000)^2);
end
xxx=0;
end
end
end
if ttttt==5
    sss=sss+1;
    ttttt=0;
end
if ttttt>0
    ttttt=ttttt+1;
end
    ttttt
    nnn=nnn+1;
if nnn==113
    nnn=1;
end
end
for k=2:kmax-1
for j=2:jmax-1
    SI=T(:,j,k);
    AI1=diag(AI,-1);
    AI2=diag(AI);
    AI3=diag(AI,1);
    VI=BI+DI*SI;
    AI3z=zeros(1,imax);
    VIz=zeros(1,imax);
    AI3z(1)=AI3(1)/AI2(1);
    for w=1:imax-2
        AI3z(w+1)=AI3(w+1)/(AI2(w+1)-
AI1(w)*AI3z(w));
    end
    VIz(1)=VI(1)/AI2(1);
    for w=1:imax-1
        VIz(w+1)=(VI(w+1)-
AI1(w)*VIz(w))/(AI2(w+1)-
AI1(w)*AI3z(w));
    end
    SI(imax)=VIz(imax);
    for w=imax-1:-1:1
        SI(w)=VIz(w)-AI3z(w)*SI(w+1);
    end
    T(:,j,k)=SI;
end
end
for i=2:imax-1
    for k=2:kmax-1
        SJ=T(i, :, k)';
        AJ1=diag(AJ,-1);
        AJ2=diag(AJ);
        AJ3=diag(AJ,1);
        VJ=BJ+DJ*SJ;
        AJ3z=zeros(1,jmax);
        VJz=zeros(1,jmax);
        AJ3z(1)=AJ3(1)/AJ2(1);
        for w=1:jmax-2
            AJ3z(w+1)=AJ3(w+1)/(AJ2(w+1)-
AJ1(w)*AJ3z(w));
        end
        VJz(1)=VJ(1)/AJ2(1);
        for w=1:jmax-1

```



```

        VJz(w+1)=(VJ(w+1)-
AJ1(w)*VJz(w))/(AJ2(w+1)-
AJ1(w)*AJ3z(w));
end
SJ(jmax)=VJz(jmax);
for w=jmax-1:-1:1
    SJ(w)=VJz(w)-AJ3z(w)*SJ(w+1);
end
SJ=SJ';
    T(i, :, k)=SJ;
        end
end
    for i=1:imax
        for j=1:jmax
            SK=T(i, j, :);
            ll=L(i, j);
            if i<=13
                if j<=13
                    Tsr=mean(mean(T(1:26, 1:26)));
                    elseif j>13
                        Tsr=mean(mean(T(1:26, j-13:j+13)));
                        end
                    elseif i>13 & i<138
                        if j<=13
                            Tsr=mean(mean(T(i-13:i+13, 1:26)));
                            elseif j>13
                                Tsr=mean(mean(T(i-
13:i+13, j-13:j+13)));
                                end
                            elseif i>138
                                if j<=13
                                    Tsr=mean(mean(T(139:151, 1:26)));
                                    elseif j>13
                                        Tsr=mean(mean(T(139:151, j-
13:j+13)));
                                        end
                                    end
                                end
                            end
                        Qrad=ee*sgm*dz*(Tsr^4- 300^4);
                        BK(kmax, 1)=-dz*ceil(ll)*q*exp(-
ka*ll^2)+(floor(1-ll))*Qrad;
                            for
                                x=1:kmax
                                    SKK(x, 1)=SK(:, :, x);
                                        end
                                    end
                                end
                            end
                        AK1=diag(AK, -1);
                        AK2=diag(AK);
                        AK3=diag(AK, 1);
                        VK=BK+DK*SKK;
                        AK3z=zeros(1, kmax);
                        VKz=zeros(1, kmax);
                        AK3z(1)=AK3(1)/AK2(1);
                        for w=1:kmax-2
                            AK3z(w+1)=AK3(w+1)/(AK2(w+1)-
AK1(w)*AK3z(w));
                        end
                        VKz(1)=VK(1)/AK2(1);
                        for w=1:kmax-1
                            VKz(w+1)=(VK(w+1)-
AK1(w)*VKz(w))/(AK2(w+1)-
AK1(w)*AK3z(w));
                        end
                        SKK(kmax)=VKz(kmax);
                        for w=kmax-1:-1:1
                            SKK(w)=VKz(w)-AK3z(w)*SKK(w+1);
                        end
                        end
                        for x=1:kmax
                            SK(:, :, x)=SKK(x, 1);
                        end
                        T(i, j, :)=SK;
                            end
                        end
                    end
                end
            end
            fff=fix(ff/fpr);
                for k=2:kmax-1
                    for j=2:jmax-1
                        T(1, j, k)=To;
                    end
                end
                if fff==1
                    T1=T;
                    for i=imax:-1:2
                        for k=2:kmax
                            for j=2:jmax
                                T1(i, j, k)=T(i-1, j, k);
                            end
                        end
                    end
                end
                ff=0;
                T=T1;
                TS=T;
                    end
                ttt=fix(ffff/tttt);
                if ttt==1
                    v=randi([3 vv])
                    fpr=1/(dt*v);
                    ffff=0;
                    ff=0;
                        end
                            ff=ff+1;
                            ffff=ffff+1;
                            tt=tt+1
                                f
                                    end
                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
    [ii, jj]=meshgrid(0:1:jmax-
1, 0:1:imax-1);
    surf(ii, jj, T(:, :, kmax))
    shading flat

```

ДОДАТОК Е. Результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану мембрани, отримані за допомогою COMSOL Multiphysics

S _M , М	R, М	D _M , М	σ, МПа
2,00E-04	0,02	0,09	811,85
2,00E-04	0,02	0,1	800,41
2,00E-04	0,02	0,11	792
2,00E-04	0,02	0,12	785,89
2,00E-04	0,02	0,13	781,47
2,00E-04	0,02	0,14	778,51
2,00E-04	0,02	0,15	776,56
2,00E-04	0,022	0,09	790,22
2,00E-04	0,022	0,1	779,82
2,00E-04	0,022	0,11	772,64
2,00E-04	0,022	0,12	767,68
2,00E-04	0,022	0,13	764,56
2,00E-04	0,022	0,14	762,7
2,00E-04	0,022	0,15	761,78
2,00E-04	0,024	0,09	774,83
2,00E-04	0,024	0,1	765,61
2,00E-04	0,024	0,11	759,66
2,00E-04	0,024	0,12	755,93
2,00E-04	0,024	0,13	753,81
2,00E-04	0,024	0,14	752,85
2,00E-04	0,024	0,15	752,76
2,00E-04	0,026	0,09	763,9
2,00E-04	0,026	0,1	755,94
2,00E-04	0,026	0,11	751,12
2,00E-04	0,026	0,12	748,48
2,00E-04	0,026	0,13	747,3
2,00E-04	0,026	0,14	747,12
2,00E-04	0,026	0,15	747,61
2,00E-04	0,028	0,09	756,31
2,00E-04	0,028	0,1	749,65
2,00E-04	0,028	0,11	745,9
2,00E-04	0,028	0,12	744,11
2,00E-04	0,028	0,13	743,63
2,00E-04	0,028	0,14	743,99
2,00E-04	0,028	0,15	744,89
2,00E-04	0,03	0,09	751,46
2,00E-04	0,03	0,1	745,85
2,00E-04	0,03	0,11	742,98
2,00E-04	0,03	0,12	741,92
2,00E-04	0,03	0,13	741,97
2,00E-04	0,03	0,14	742,72
2,00E-04	0,03	0,15	743,87
2,00E-04	0,032	0,09	748,57
2,00E-04	0,032	0,1	743,93
2,00E-04	0,032	0,11	741,85
2,00E-04	0,032	0,12	741,34
2,00E-04	0,032	0,13	741,78
2,00E-04	0,032	0,14	742,76
2,00E-04	0,032	0,15	744,04
2,00E-04	0,034	0,09	747,31
2,00E-04	0,034	0,1	743,54

2,00E-04	0,034	0,11	742,07
2,00E-04	0,034	0,12	741,96
2,00E-04	0,034	0,13	742,63
2,00E-04	0,034	0,14	743,73
2,00E-04	0,034	0,15	745,03
2,00E-04	0,036	0,09	747,34
2,00E-04	0,036	0,1	744,26
2,00E-04	0,036	0,11	743,25
2,00E-04	0,036	0,12	743,41
2,00E-04	0,036	0,13	744,21
2,00E-04	0,036	0,14	745,32
2,00E-04	0,036	0,15	746,56
2,00E-04	0,038	0,09	748,37
2,00E-04	0,038	0,1	745,83
2,00E-04	0,038	0,11	745,13
2,00E-04	0,038	0,12	745,45
2,00E-04	0,038	0,13	746,28
2,00E-04	0,038	0,14	747,34
2,00E-04	0,038	0,15	748,47
2,00E-04	0,04	0,09	750,13
2,00E-04	0,04	0,1	748
2,00E-04	0,04	0,11	747,52
2,00E-04	0,04	0,12	747,89
2,00E-04	0,04	0,13	748,69
2,00E-04	0,04	0,14	749,64
2,00E-04	0,04	0,15	750,61
3,00E-04	0,02	0,09	402,27
3,00E-04	0,02	0,1	389,56
3,00E-04	0,02	0,11	377,47
3,00E-04	0,02	0,12	366,04
3,00E-04	0,02	0,13	355,36
3,00E-04	0,02	0,14	348,17
3,00E-04	0,02	0,15	355,45
3,00E-04	0,022	0,09	379,16
3,00E-04	0,022	0,1	365,4
3,00E-04	0,022	0,11	352,54
3,00E-04	0,022	0,12	340,59
3,00E-04	0,022	0,13	347,42
3,00E-04	0,022	0,14	355,63
3,00E-04	0,022	0,15	363,3
3,00E-04	0,024	0,09	358,55
3,00E-04	0,024	0,1	344,15
3,00E-04	0,024	0,11	336,6
3,00E-04	0,024	0,12	346,37
3,00E-04	0,024	0,13	355,51
3,00E-04	0,024	0,14	363,92
3,00E-04	0,024	0,15	371,61
3,00E-04	0,026	0,09	340,07
3,00E-04	0,026	0,1	333,7
3,00E-04	0,026	0,11	344,59
3,00E-04	0,026	0,12	354,7
3,00E-04	0,026	0,13	363,93

3,00E-04	0,026	0,14	372,25
3,00E-04	0,026	0,15	379,72
3,00E-04	0,028	0,09	329,72
3,00E-04	0,028	0,1	341,76
3,00E-04	0,028	0,11	352,96
3,00E-04	0,028	0,12	363,12
3,00E-04	0,028	0,13	372,19
3,00E-04	0,028	0,14	380,24
3,00E-04	0,028	0,15	387,35
3,00E-04	0,03	0,09	337,72
3,00E-04	0,03	0,1	350,09
3,00E-04	0,03	0,11	361,33
3,00E-04	0,03	0,12	371,31
3,00E-04	0,03	0,13	380,07
3,00E-04	0,03	0,14	387,73
3,00E-04	0,03	0,15	394,39
3,00E-04	0,032	0,09	345,91
3,00E-04	0,032	0,1	358,38
3,00E-04	0,032	0,11	369,45
3,00E-04	0,032	0,12	379,11
3,00E-04	0,032	0,13	387,45
3,00E-04	0,032	0,14	394,65
3,00E-04	0,032	0,15	400,85
3,00E-04	0,034	0,09	354,1
3,00E-04	0,034	0,1	366,46
3,00E-04	0,034	0,11	377,21
3,00E-04	0,034	0,12	386,44
3,00E-04	0,034	0,13	394,3
3,00E-04	0,034	0,14	401,01
3,00E-04	0,034	0,15	406,72
3,00E-04	0,036	0,09	362,12
3,00E-04	0,036	0,1	374,2
3,00E-04	0,036	0,11	384,53
3,00E-04	0,036	0,12	393,27
3,00E-04	0,036	0,13	400,63
3,00E-04	0,036	0,14	406,83
3,00E-04	0,036	0,15	412,05
3,00E-04	0,038	0,09	369,86
3,00E-04	0,038	0,1	381,56
3,00E-04	0,038	0,11	391,39
3,00E-04	0,038	0,12	399,61
3,00E-04	0,038	0,13	406,44
3,00E-04	0,038	0,14	412,14
3,00E-04	0,038	0,15	416,91
3,00E-04	0,04	0,09	377,28
3,00E-04	0,04	0,1	388,49
3,00E-04	0,04	0,11	397,79
3,00E-04	0,04	0,12	405,46
3,00E-04	0,04	0,13	411,78
3,00E-04	0,04	0,14	416,99
3,00E-04	0,04	0,15	421,31
4,00E-04	0,02	0,09	329,99

4,00E-04	0,02	0,1	310,92
4,00E-04	0,02	0,11	296,71
4,00E-04	0,02	0,12	284,63
4,00E-04	0,02	0,13	274,69
4,00E-04	0,02	0,14	266,86
4,00E-04	0,02	0,15	261,15
4,00E-04	0,022	0,09	312,82
4,00E-04	0,022	0,1	296,63
4,00E-04	0,022	0,11	283,22
4,00E-04	0,022	0,12	272,56
4,00E-04	0,022	0,13	264,64
4,00E-04	0,022	0,14	259,45
4,00E-04	0,022	0,15	259,55
4,00E-04	0,024	0,09	299,84
4,00E-04	0,024	0,1	284,6
4,00E-04	0,024	0,11	272,78
4,00E-04	0,024	0,12	264,35
4,00E-04	0,024	0,13	259,31
4,00E-04	0,024	0,14	264,19
4,00E-04	0,024	0,15	274,26
4,00E-04	0,026	0,09	288,83
4,00E-04	0,026	0,1	275,17
4,00E-04	0,026	0,11	265,59
4,00E-04	0,026	0,12	260,1
4,00E-04	0,026	0,13	266,64
4,00E-04	0,026	0,14	277,49
4,00E-04	0,026	0,15	286,8
4,00E-04	0,028	0,09	279,92
4,00E-04	0,028	0,1	268,39
4,00E-04	0,028	0,11	261,66
4,00E-04	0,028	0,12	267,04
4,00E-04	0,028	0,13	278,93
4,00E-04	0,028	0,14	288,98
4,00E-04	0,028	0,15	297,5
4,00E-04	0,03	0,09	273,14
4,00E-04	0,03	0,1	264,24
4,00E-04	0,03	0,11	265,35
4,00E-04	0,03	0,12	278,63
4,00E-04	0,03	0,13	289,67
4,00E-04	0,03	0,14	298,91
4,00E-04	0,03	0,15	306,68
4,00E-04	0,032	0,09	268,45
4,00E-04	0,032	0,1	262,7
4,00E-04	0,032	0,11	276,48
4,00E-04	0,032	0,12	288,86
4,00E-04	0,032	0,13	299,07
4,00E-04	0,032	0,14	307,53
4,00E-04	0,032	0,15	314,58
4,00E-04	0,034	0,09	265,81
4,00E-04	0,034	0,1	272,2
4,00E-04	0,034	0,11	286,41
4,00E-04	0,034	0,12	297,92
4,00E-04	0,034	0,13	307,32
4,00E-04	0,034	0,14	315,04
4,00E-04	0,034	0,15	321,43
4,00E-04	0,036	0,09	265,33
4,00E-04	0,036	0,1	282
4,00E-04	0,036	0,11	295,27
4,00E-04	0,036	0,12	305,93
4,00E-04	0,036	0,13	314,56
4,00E-04	0,036	0,14	321,59

4,00E-04	0,036	0,15	327,38
4,00E-04	0,038	0,09	275,13
4,00E-04	0,038	0,1	290,82
4,00E-04	0,038	0,11	303,19
4,00E-04	0,038	0,12	313,03
4,00E-04	0,038	0,13	320,94
4,00E-04	0,038	0,14	327,34
4,00E-04	0,038	0,15	332,58
4,00E-04	0,04	0,09	284,05
4,00E-04	0,04	0,1	298,77
4,00E-04	0,04	0,11	310,26
4,00E-04	0,04	0,12	319,33
4,00E-04	0,04	0,13	326,57
4,00E-04	0,04	0,14	332,39
4,00E-04	0,04	0,15	337,13
5,00E-04	0,02	0,09	376,64
5,00E-04	0,02	0,1	349,75
5,00E-04	0,02	0,11	326,34
5,00E-04	0,02	0,12	306,02
5,00E-04	0,02	0,13	288,47
5,00E-04	0,02	0,14	273,41
5,00E-04	0,02	0,15	260,63
5,00E-04	0,022	0,09	349,27
5,00E-04	0,022	0,1	322,79
5,00E-04	0,022	0,11	300,32
5,00E-04	0,022	0,12	281,35
5,00E-04	0,022	0,13	265,51
5,00E-04	0,022	0,14	253,03
5,00E-04	0,022	0,15	247,74
5,00E-04	0,024	0,09	324,57
5,00E-04	0,024	0,1	299,24
5,00E-04	0,024	0,11	278,32
5,00E-04	0,024	0,12	261,23
5,00E-04	0,024	0,13	252,62
5,00E-04	0,024	0,14	248,02
5,00E-04	0,024	0,15	258,36
5,00E-04	0,026	0,09	302,8
5,00E-04	0,026	0,1	279,08
5,00E-04	0,026	0,11	262,11
5,00E-04	0,026	0,12	253,64
5,00E-04	0,026	0,13	251,62
5,00E-04	0,026	0,14	263,08
5,00E-04	0,026	0,15	272,71
5,00E-04	0,028	0,09	283,82
5,00E-04	0,028	0,1	265,62
5,00E-04	0,028	0,11	255,82
5,00E-04	0,028	0,12	252,95
5,00E-04	0,028	0,13	265,51
5,00E-04	0,028	0,14	275,9
5,00E-04	0,028	0,15	284,53
5,00E-04	0,03	0,09	271,49
5,00E-04	0,03	0,1	259,34
5,00E-04	0,03	0,11	252,86
5,00E-04	0,03	0,12	265,81
5,00E-04	0,03	0,13	277,26
5,00E-04	0,03	0,14	286,64
5,00E-04	0,03	0,15	294,4
5,00E-04	0,032	0,09	264,8
5,00E-04	0,032	0,1	255,76
5,00E-04	0,032	0,11	263,92
5,00E-04	0,032	0,12	276,85

5,00E-04	0,032	0,13	287,26
5,00E-04	0,032	0,14	295,73
5,00E-04	0,032	0,15	302,7
5,00E-04	0,034	0,09	260,3
5,00E-04	0,034	0,1	259,52
5,00E-04	0,034	0,11	274,5
5,00E-04	0,034	0,12	286,34
5,00E-04	0,034	0,13	295,81
5,00E-04	0,034	0,14	303,47
5,00E-04	0,034	0,15	309,73
5,00E-04	0,036	0,09	257,84
5,00E-04	0,036	0,1	269,9
5,00E-04	0,036	0,11	283,72
5,00E-04	0,036	0,12	294,56
5,00E-04	0,036	0,13	303,17
5,00E-04	0,036	0,14	310,09
5,00E-04	0,036	0,15	315,72
5,00E-04	0,038	0,09	262,44
5,00E-04	0,038	0,1	279,03
5,00E-04	0,038	0,11	291,77
5,00E-04	0,038	0,12	301,68
5,00E-04	0,038	0,13	309,51
5,00E-04	0,038	0,14	315,78
5,00E-04	0,038	0,15	320,85
5,00E-04	0,04	0,09	271,68
5,00E-04	0,04	0,1	287,08
5,00E-04	0,04	0,11	298,81
5,00E-04	0,04	0,12	307,88
5,00E-04	0,04	0,13	315,01
5,00E-04	0,04	0,14	320,68
5,00E-04	0,04	0,15	325,25
6,00E-04	0,02	0,09	408,85
6,00E-04	0,02	0,1	377,29
6,00E-04	0,02	0,11	350,47
6,00E-04	0,02	0,12	327,72
6,00E-04	0,02	0,13	308,48
6,00E-04	0,02	0,14	292,31
6,00E-04	0,02	0,15	278,81
6,00E-04	0,022	0,09	376,27
6,00E-04	0,022	0,1	346,31
6,00E-04	0,022	0,11	321,53
6,00E-04	0,022	0,12	301,13
6,00E-04	0,022	0,13	284,47
6,00E-04	0,022	0,14	271,04
6,00E-04	0,022	0,15	260,49
6,00E-04	0,024	0,09	348,41
6,00E-04	0,024	0,1	320,67
6,00E-04	0,024	0,11	298,37
6,00E-04	0,024	0,12	280,64
6,00E-04	0,024	0,13	266,82
6,00E-04	0,024	0,14	263,92
6,00E-04	0,024	0,15	274,6
6,00E-04	0,026	0,09	324,9
6,00E-04	0,026	0,1	299,68
6,00E-04	0,026	0,11	280,08
6,00E-04	0,026	0,12	265,21
6,00E-04	0,026	0,13	269,05
6,00E-04	0,026	0,14	280,46
6,00E-04	0,026	0,15	289,94
6,00E-04	0,028	0,09	305,18
6,00E-04	0,028	0,1	282,64

6,00E-04	0,028	0,11	265,88
6,00E-04	0,028	0,12	271,26
6,00E-04	0,028	0,13	283,77
6,00E-04	0,028	0,14	293,97
6,00E-04	0,028	0,15	302,37
6,00E-04	0,03	0,09	288,73
6,00E-04	0,03	0,1	268,98
6,00E-04	0,03	0,11	270,66
6,00E-04	0,03	0,12	284,73
6,00E-04	0,03	0,13	296
6,00E-04	0,03	0,14	305,12
6,00E-04	0,03	0,15	312,59
6,00E-04	0,032	0,09	275,09
6,00E-04	0,032	0,1	267,06
6,00E-04	0,032	0,11	283,34
6,00E-04	0,032	0,12	296,1
6,00E-04	0,032	0,13	306,25
6,00E-04	0,032	0,14	314,42
6,00E-04	0,032	0,15	321,08
6,00E-04	0,034	0,09	267,3
6,00E-04	0,034	0,1	279,28
6,00E-04	0,034	0,11	294,16
6,00E-04	0,034	0,12	305,76
6,00E-04	0,034	0,13	314,91
6,00E-04	0,034	0,14	322,24
6,00E-04	0,034	0,15	328,19
6,00E-04	0,036	0,09	271,94
6,00E-04	0,036	0,1	289,85
6,00E-04	0,036	0,11	303,46
6,00E-04	0,036	0,12	314
6,00E-04	0,036	0,13	322,26
6,00E-04	0,036	0,14	328,86
6,00E-04	0,036	0,15	334,18
6,00E-04	0,038	0,09	282,53
6,00E-04	0,038	0,1	299,02
6,00E-04	0,038	0,11	311,48
6,00E-04	0,038	0,12	321,06
6,00E-04	0,038	0,13	328,54
6,00E-04	0,038	0,14	334,48
6,00E-04	0,038	0,15	339,26
6,00E-04	0,04	0,09	291,81
6,00E-04	0,04	0,1	307,01
6,00E-04	0,04	0,11	318,41
6,00E-04	0,04	0,12	327,13
6,00E-04	0,04	0,13	333,91
6,00E-04	0,04	0,14	339,27
6,00E-04	0,04	0,15	343,56
7,00E-04	0,02	0,09	432,73
7,00E-04	0,02	0,1	398,22
7,00E-04	0,02	0,11	369,59
7,00E-04	0,02	0,12	345,86
7,00E-04	0,02	0,13	326,26
7,00E-04	0,02	0,14	310,17
7,00E-04	0,02	0,15	297,09
7,00E-04	0,022	0,09	396,99
7,00E-04	0,022	0,1	365,34
7,00E-04	0,022	0,11	339,85
7,00E-04	0,022	0,12	319,42
7,00E-04	0,022	0,13	303,24
7,00E-04	0,022	0,14	290,66
7,00E-04	0,022	0,15	286,26

7,00E-04	0,024	0,09	367,79
7,00E-04	0,024	0,1	339,39
7,00E-04	0,024	0,11	317,28
7,00E-04	0,024	0,12	300,31
7,00E-04	0,024	0,13	287,68
7,00E-04	0,024	0,14	296,26
7,00E-04	0,024	0,15	306,73
7,00E-04	0,026	0,09	344,1
7,00E-04	0,026	0,1	319,1
7,00E-04	0,026	0,11	300,45
7,00E-04	0,026	0,12	288,79
7,00E-04	0,026	0,13	302,52
7,00E-04	0,026	0,14	313,69
7,00E-04	0,026	0,15	322,87
7,00E-04	0,028	0,09	325
7,00E-04	0,028	0,1	303,44
7,00E-04	0,028	0,11	290,32
7,00E-04	0,028	0,12	305,65
7,00E-04	0,028	0,13	317,89
7,00E-04	0,028	0,14	327,77
7,00E-04	0,028	0,15	335,86
7,00E-04	0,03	0,09	309,71
7,00E-04	0,03	0,1	291,64
7,00E-04	0,03	0,11	305,83
7,00E-04	0,03	0,12	319,62
7,00E-04	0,03	0,13	330,54
7,00E-04	0,03	0,14	339,32
7,00E-04	0,03	0,15	346,44
7,00E-04	0,032	0,09	297,66
7,00E-04	0,032	0,1	302,87
7,00E-04	0,032	0,11	318,88
7,00E-04	0,032	0,12	331,29
7,00E-04	0,032	0,13	341,07
7,00E-04	0,032	0,14	348,87
7,00E-04	0,032	0,15	355,18
7,00E-04	0,034	0,09	296,18
7,00E-04	0,034	0,1	315,4
7,00E-04	0,034	0,11	329,94
7,00E-04	0,034	0,12	341,12
7,00E-04	0,034	0,13	349,89
7,00E-04	0,034	0,14	356,85
7,00E-04	0,034	0,15	362,46
7,00E-04	0,036	0,09	308,57
7,00E-04	0,036	0,1	326,15
7,00E-04	0,036	0,11	339,34
7,00E-04	0,036	0,12	349,45
7,00E-04	0,036	0,13	357,32
7,00E-04	0,036	0,14	363,54
7,00E-04	0,036	0,15	368,55
7,00E-04	0,038	0,09	319,29
7,00E-04	0,038	0,1	335,38
7,00E-04	0,038	0,11	347,37
7,00E-04	0,038	0,12	356,51
7,00E-04	0,038	0,13	363,6
7,00E-04	0,038	0,14	369,18
7,00E-04	0,038	0,15	373,64
7,00E-04	0,04	0,09	328,6
7,00E-04	0,04	0,1	343,32
7,00E-04	0,04	0,11	354,23
7,00E-04	0,04	0,12	362,51
7,00E-04	0,04	0,13	368,91

7,00E-04	0,04	0,14	373,93
7,00E-04	0,04	0,15	377,93
8,00E-04	0,02	0,09	452,11
8,00E-04	0,02	0,1	416,06
8,00E-04	0,02	0,11	386,83
8,00E-04	0,02	0,12	363,18
8,00E-04	0,02	0,13	344,14
8,00E-04	0,02	0,14	328,96
8,00E-04	0,02	0,15	317,07
8,00E-04	0,022	0,09	414,95
8,00E-04	0,022	0,1	382,95
8,00E-04	0,022	0,11	357,9
8,00E-04	0,022	0,12	338,45
8,00E-04	0,022	0,13	323,65
8,00E-04	0,022	0,14	314,91
8,00E-04	0,022	0,15	326,74
8,00E-04	0,024	0,09	385,84
8,00E-04	0,024	0,1	358,07
8,00E-04	0,024	0,11	337,24
8,00E-04	0,024	0,12	322,05
8,00E-04	0,024	0,13	325,78
8,00E-04	0,024	0,14	338,23
8,00E-04	0,024	0,15	348,47
8,00E-04	0,026	0,09	363,18
8,00E-04	0,026	0,1	339,65
8,00E-04	0,026	0,11	323,07
8,00E-04	0,026	0,12	332,24
8,00E-04	0,026	0,13	345,73
8,00E-04	0,026	0,14	356,63
8,00E-04	0,026	0,15	365,55
8,00E-04	0,028	0,09	345,75
8,00E-04	0,028	0,1	326,44
8,00E-04	0,028	0,11	334,86
8,00E-04	0,028	0,12	349,93
8,00E-04	0,028	0,13	361,87
8,00E-04	0,028	0,14	371,45
8,00E-04	0,028	0,15	379,22
8,00E-04	0,03	0,09	332,6
8,00E-04	0,03	0,1	333,67
8,00E-04	0,03	0,11	351,05
8,00E-04	0,03	0,12	364,51
8,00E-04	0,03	0,13	375,09
8,00E-04	0,03	0,14	383,52
8,00E-04	0,03	0,15	390,34
8,00E-04	0,032	0,09	328,17
8,00E-04	0,032	0,1	348,94
8,00E-04	0,032	0,11	364,58
8,00E-04	0,032	0,12	376,61
8,00E-04	0,032	0,13	385,99
8,00E-04	0,032	0,14	393,45
8,00E-04	0,032	0,15	399,44
8,00E-04	0,034	0,09	343,01
8,00E-04	0,034	0,1	361,85
8,00E-04	0,034	0,11	375,93
8,00E-04	0,034	0,12	386,68
8,00E-04	0,034	0,13	395,03
8,00E-04	0,034	0,14	401,63
8,00E-04	0,034	0,15	406,92
8,00E-04	0,036	0,09	355,69
8,00E-04	0,036	0,1	372,78
8,00E-04	0,036	0,11	385,47

8,00E-04	0,036	0,12	395,1
8,00E-04	0,036	0,13	402,54
8,00E-04	0,036	0,14	408,4
8,00E-04	0,036	0,15	413,08
8,00E-04	0,038	0,09	366,54
8,00E-04	0,038	0,1	382,05
8,00E-04	0,038	0,11	393,49
8,00E-04	0,038	0,12	402,13
8,00E-04	0,038	0,13	408,8
8,00E-04	0,038	0,14	414,02
8,00E-04	0,038	0,15	418,17
8,00E-04	0,04	0,09	375,82
8,00E-04	0,04	0,1	389,91
8,00E-04	0,04	0,11	400,24
8,00E-04	0,04	0,12	408,02
8,00E-04	0,04	0,13	414
8,00E-04	0,04	0,14	418,66
8,00E-04	0,04	0,15	422,36
9,00E-04	0,02	0,09	469,37
9,00E-04	0,02	0,1	432,9
9,00E-04	0,02	0,11	404,02
9,00E-04	0,02	0,12	381,25
9,00E-04	0,02	0,13	363,47
9,00E-04	0,02	0,14	349,85
9,00E-04	0,02	0,15	343,58
9,00E-04	0,022	0,09	432,22
9,00E-04	0,022	0,1	400,92
9,00E-04	0,022	0,11	377,19
9,00E-04	0,022	0,12	359,52
9,00E-04	0,022	0,13	348,23
9,00E-04	0,022	0,14	362,4
9,00E-04	0,022	0,15	374,1
9,00E-04	0,024	0,09	404,36
9,00E-04	0,024	0,1	378,23
9,00E-04	0,024	0,11	359,59
9,00E-04	0,024	0,12	359,89
9,00E-04	0,024	0,13	375,07
9,00E-04	0,024	0,14	387,37
9,00E-04	0,024	0,15	397,45
9,00E-04	0,026	0,09	383,75
9,00E-04	0,026	0,1	362,7
9,00E-04	0,026	0,11	366,28
9,00E-04	0,026	0,12	383,08
9,00E-04	0,026	0,13	396,4
9,00E-04	0,026	0,14	407,1
9,00E-04	0,026	0,15	415,78
9,00E-04	0,028	0,09	368,9
9,00E-04	0,028	0,1	367,82
9,00E-04	0,028	0,11	387,02
9,00E-04	0,028	0,12	401,87
9,00E-04	0,028	0,13	413,52
9,00E-04	0,028	0,14	422,79
9,00E-04	0,028	0,15	430,29
9,00E-04	0,03	0,09	364,2
9,00E-04	0,03	0,1	386,94
9,00E-04	0,03	0,11	404,02
9,00E-04	0,03	0,12	417,1
9,00E-04	0,03	0,13	427,28

9,00E-04	0,03	0,14	435,35
9,00E-04	0,03	0,15	441,82
9,00E-04	0,032	0,09	382,4
9,00E-04	0,032	0,1	402,78
9,00E-04	0,032	0,11	417,93
9,00E-04	0,032	0,12	429,47
9,00E-04	0,032	0,13	438,4
9,00E-04	0,032	0,14	445,44
9,00E-04	0,032	0,15	451,07
9,00E-04	0,034	0,09	397,63
9,00E-04	0,034	0,1	415,88
9,00E-04	0,034	0,11	429,37
9,00E-04	0,034	0,12	439,56
9,00E-04	0,034	0,13	447,43
9,00E-04	0,034	0,14	453,62
9,00E-04	0,034	0,15	458,55
9,00E-04	0,036	0,09	410,39
9,00E-04	0,036	0,11	438,79
9,00E-04	0,036	0,12	447,85
9,00E-04	0,036	0,13	454,82
9,00E-04	0,036	0,14	460,27
9,00E-04	0,036	0,15	464,61
9,00E-04	0,038	0,09	421,09
9,00E-04	0,038	0,1	435,82
9,00E-04	0,038	0,11	446,59
9,00E-04	0,038	0,12	454,67
9,00E-04	0,038	0,13	460,87
9,00E-04	0,038	0,14	465,7
9,00E-04	0,038	0,15	469,52
9,00E-04	0,04	0,09	430,11
9,00E-04	0,04	0,1	443,39
9,00E-04	0,04	0,11	453,07
9,00E-04	0,04	0,12	460,3
9,00E-04	0,04	0,13	465,82
9,00E-04	0,04	0,14	470,11
9,00E-04	0,04	0,15	473,49
0,001	0,02	0,09	486,02
0,001	0,02	0,1	450,03
0,001	0,02	0,11	422,25
0,001	0,02	0,12	401,02
0,001	0,02	0,13	385,1
0,001	0,02	0,14	380,73
0,001	0,02	0,15	394,45
0,001	0,022	0,09	450,08
0,001	0,022	0,1	420,33
0,001	0,022	0,11	398,66
0,001	0,022	0,12	384,31
0,001	0,022	0,13	401,82
0,001	0,022	0,14	416,36
0,001	0,022	0,15	428,34
0,001	0,024	0,09	424,48
0,001	0,024	0,1	400,83
0,001	0,024	0,11	396,74
0,001	0,024	0,12	416,14
0,001	0,024	0,13	431,47
0,001	0,024	0,14	443,71
0,001	0,024	0,15	453,61

0,001	0,026	0,09	406,8
0,001	0,026	0,1	402,67
0,001	0,026	0,11	424,34
0,001	0,026	0,12	440,98
0,001	0,026	0,13	453,98
0,001	0,026	0,14	464,31
0,001	0,026	0,15	472,63
0,001	0,028	0,09	401,92
0,001	0,028	0,1	427,12
0,001	0,028	0,11	445,92
0,001	0,028	0,12	460,26
0,001	0,028	0,13	471,41
0,001	0,028	0,14	480,22
0,001	0,028	0,15	487,29
0,001	0,03	0,09	424,48
0,001	0,03	0,1	446,63
0,001	0,03	0,11	463,04
0,001	0,03	0,12	475,49
0,001	0,03	0,13	485,13
0,001	0,03	0,14	492,72
0,001	0,03	0,15	498,79
0,001	0,032	0,09	442,8
0,001	0,032	0,1	462,36
0,001	0,032	0,11	476,79
0,001	0,032	0,12	487,67
0,001	0,032	0,13	496,07
0,001	0,032	0,14	502,65
0,001	0,032	0,15	507,9
0,001	0,034	0,09	457,83
0,001	0,034	0,1	475,19
0,001	0,034	0,11	487,92
0,001	0,034	0,12	497,5
0,001	0,034	0,13	504,85
0,001	0,034	0,14	510,6
0,001	0,034	0,15	515,16
0,001	0,036	0,09	470,24
0,001	0,036	0,1	485,71
0,001	0,036	0,11	497
0,001	0,036	0,12	505,46
0,001	0,036	0,13	511,93
0,001	0,036	0,14	516,98
0,001	0,036	0,15	520,97
0,001	0,038	0,09	480,54
0,001	0,038	0,1	494,38
0,001	0,038	0,11	504,44
0,001	0,038	0,12	511,95
0,001	0,038	0,13	517,67
0,001	0,038	0,14	522,11
0,001	0,038	0,15	525,61
0,001	0,04	0,09	489,11
0,001	0,04	0,1	501,54
0,001	0,04	0,11	510,53
0,001	0,04	0,12	517,21
0,001	0,04	0,13	522,28
0,001	0,04	0,14	526,2
0,001	0,04	0,15	529,29

ДОДАТОК Є. Програма моделювання роботи механотронної системи керування виплавною титану при електронно-променевої плавці в MATLAB

```

clc
clear
l=0.8;
dx=0.001;
imax=(l/dx)+1;
b=0.3;
dy=0.001;
jmax=(b/dy)+1;
h=0.03;
dz=0.001;
kmax=(h/dz)+1;
aa=0.000007585;
ka=1500;
L=zeros(imax,jmax);
t=10;
dt=1/30;
fmax=(t/dt)+1;
lmb=20;
qst=235000;
qd=60000;
ee=0.3;
sgm= 5.67*10^-8;
To=2000;
q=65*10^6;
gar=0;
Gtit=0;
GGtit=0;
ff=0;
cc=0;
vh=1;
vv=vh*5;
fpr=fix(1/(dt*vv));
cpr=(1/(dt*vh));
ffff1=1;
ffff2=1;
ffff3=1;
ffff4=1;
tttt1=randi([450 600]);
tttt2=randi([450 600]);
tttt3=randi([450 600]);
tttt4=randi([450 600]);
nnn1=1;
nnn2=1;
nnn3=1;
nnn4=1;
llll=60;
tt=60;
ttttt1=0;
ttttt2=0;
ttttt3=0;
ttttt4=0;
NN=[1 1; 1 2; 1 3; 1 4; 1 5; 1 6; 1 7; 1 8; 1 9; 1 10;
1 11; 1 12; 1 13; 1 14; 1 15; 2 15; 2 14; 2 13; 2 12;
2 11; 2 10; 2 9; 2 8; 2 7; 2 6; 2 5; 2 4; 2 3; 2 2; 2
1; 3 1; 3 2; 3 3; 3 4; 3 5; 3 6; 3 7; 3 8; 3 9; 3 10; 3
11; 3 12; 3 13; 3 14; 3 15; 4 15; 4 14; 4 13; 4 12; 4
11; 4 10; 4 9; 4 8; 4 7; 4 6; 4 5; 4 4; 4 3; 4 2; 4 1; 5
1; 5 2; 5 3; 5 4; 5 5; 5 6; 5 7; 5 8; 5 9; 5 10; 5 11; 5
12; 5 13; 5 14; 5 15; 6 15; 6 14; 6 13; 6 12; 6 11; 6
10; 6 9; 6 8; 6 7; 6 6; 6 5; 6 4; 6 3; 6 2; 6 1; 7 1; 7
2; 7 3; 7 4; 7 5; 7 6; 7 7; 7 8; 7 9; 7 10; 7 11; 7 12;
7 13; 7 14; 7 15 ];
T=zeros(imax,jmax,kmax);
for i=1:imax
    for j=1:jmax
        for k=1:kmax
            T(i,j,k)=randi([2100 2200]);
        end
    end
end
L1=zeros(26,26);
for www=1:13
    if www==1
        for xxx=12:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif www==2
        for xxx=9:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif www==3
        for xxx=7:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif www==4
        for xxx=6:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif www==5
        for xxx=5:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif www==6
        for xxx=4:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif www==7 | www==8
        for xxx=3:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif www==9 | www==10 | www==11
        for xxx=2:13

```

```

    L1(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
    end
    elseif    www==12 | www==13
        for xxx=1:13
            L1(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
            end
        end
    end
end
for www=14:26
    for xxx=1:13
        L1(xxx,www)=L1(xxx,27-www);
    end
end
for www=1:13
    for xxx=14:26
        L1(xxx,www)=L1(27-xxx,www);
    end
end
for www=14:26
    for xxx=14:26
        L1(xxx,www)=L1(27-xxx,27-www);
    end
end
L2=zeros(13,26);
for www=1:13
    if www==1
        for xxx=12:13
            L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif    www==2
        for xxx=9:13
            L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif    www==3
        for xxx=7:13
            L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif    www==4
        for xxx=6:13
            L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif    www==5
        for xxx=5:13
            L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif    www==6
        for xxx=4:13
            L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif    www==7 | www==8
        for xxx=3:13
            L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif    www==9 | www==10 | www==11

```

```

        for xxx=2:13
            L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif    www==12 | www==13
        for xxx=1:13
            L2(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    end
end
for www=14:26
    for xxx=1:13
        L2(xxx,www)=L2(xxx,27-www);
    end
end
L2=rot90(L2);
L3=zeros(13,26);
for www=1:13
    if www==1
        for xxx=12:13
            L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif    www==2
        for xxx=9:13
            L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif    www==3
        for xxx=7:13
            L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif    www==4
        for xxx=6:13
            L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif    www==5
        for xxx=5:13
            L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif    www==6
        for xxx=4:13
            L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif    www==7 | www==8
        for xxx=3:13
            L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif    www==9 | www==10 | www==11
        for xxx=2:13
            L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    elseif    www==12 | www==13
        for xxx=1:13
            L3(www,xxx)=sqrt(((www-14)/1000)^2+((xxx-
14)/1000)^2);
        end
    end
end

```

```

    end
  end
end
for www=14:26
  for xxx=1:13
    L3(xxx,www)=L3(xxx,27-www);
  end
end
L3=fliplr(rot90(L3));
TS=T;
AI=zeros(imax,imax);
BI=zeros(imax,1);
DI=zeros(imax,imax);
AI(1,1)=-lmb;
AI(1,2)=lmb;
AI(imax,imax-1)=lmb;
AI(imax,imax)=-lmb;
BI(1,1)=0;
for i=2:(imax-1)
  AI(i,i-1)=aa*dt;
  AI(i,i)=-dx^2+2*aa*dt;
  AI(i,i+1)=aa*dt;
  DI(i,i)=-dx^2;
end
AJ=zeros(jmax,jmax);
BJ=zeros(jmax,1);
DJ=zeros(jmax,jmax);
AJ(1,1)=-lmb;
AJ(1,2)=lmb;
AJ(jmax,jmax-1)=lmb;
AJ(jmax,jmax)=-lmb;
BJ(1,1)=qst*dy;
BJ(jmax,1)=qst*dy;
for j=2:(jmax-1)
  AJ(j,j-1)=aa*dt;
  AJ(j,j)=-dy^2+2*aa*dt;
  AJ(j,j+1)=aa*dt;
  DJ(j,j)=-dy^2;
end
AK=zeros(kmax,kmax);
BK=zeros(kmax,1);
DK=zeros(kmax,kmax);
AK(1,1)=-lmb;
AK(1,2)=lmb;
AK(kmax,kmax-1)=lmb;
AK(kmax,kmax)=-lmb;
BK(1,1)=qd*dz;
SKK=zeros(kmax,1);
for k=2:(kmax-1)
  AK(k,k-1)=aa*dt;
  AK(k,k)=-dz^2+2*aa*dt;
  AK(k,k+1)=aa*dt;
  DK(k,k)=-dz^2;
end
TM31=zeros(imax,jmax,(fmax-1)/10);
TM20=zeros(imax,jmax,(fmax-1)/30);
TM15=zeros(imax,jmax,(fmax-1)/30);
TMEAN31=zeros(2,(fmax-1)/30);
TMEAN=zeros(2,(fmax-1)/30);
GTIT=zeros(2,(fmax-1)/30);
QGtit=zeros(2,(fmax-1)/150);
GAR=zeros(2,(fmax-1)/30);
tic

```

```

for f=1:fmax
  f
  if fix(f/10)==f/10
    TM31(:,f/10)=T(:,kmax);
  end
  if f/30==fix(f/30)
    TM20(:,f/30)=T(:,20);
    TM15(:,f/30)=T(:,15);
    TMEAN31(:,f/30)=mean(mean(T(:,31)));
    TMEAN(:,f/30)=mean(mean(mean(T)));
    GTIT(:,f/30)=Gtit;
  end
  L=zeros(imax,jmax);
  ti=fix(tt/lill);
  if ti==1
    Tkmax=T(:,kmax);
    Tsr=zeros(12,30);
    for i=26:25:751
      for j=1:25:276
        Tsr(ceil(j/25),(i-1)/25)=mean(mean(Tkmax(i:i+25, j:(j+25))));
      end
    end
    Tkoor1=zeros((((imax-1)/25)*((jmax-51)/25))/4,3);
    Tkoor2=zeros((((imax-1)/25)*((jmax-51)/25))/4,3);
    Tkoor3=zeros((((imax-1)/25)*((jmax-51)/25))/4,3);
    Tkoor4=zeros((((imax-1)/25)*((jmax-51)/25))/4,3);
    p=0;
    for iii=1:15
      for jjj=1:6
        p=p+1;
        Tkoor1(p,1:3)=[Tsr(jjj,iii), jjj,iii];
      end
    end
    sort1=-sortrows(-Tkoor1,1);
    sort1=flipud(-sortrows(-Tkoor1,1));
    p=0;
    for iii=16:30
      for jjj=1:6
        p=p+1;
        Tkoor2(p,1:3)=[Tsr(jjj,iii), jjj,iii];
      end
    end
    sort2=-sortrows(-Tkoor2,1);
    sort2=flipud(-sortrows(-Tkoor2,1));
    p=0;
    for iii=1:15
      for jjj=7:12
        p=p+1;
        Tkoor3(p,1:3)=[Tsr(jjj,iii), jjj,iii];
      end
    end
    sort3=-sortrows(-Tkoor3,1);
    sort3=flipud(-sortrows(-Tkoor3,1));
    p=0;
    for iii=16:30
      for jjj=7:12
        p=p+1;
        Tkoor4(p,1:3)=[Tsr(jjj,iii), jjj,iii];
      end
    end
    sort4=-sortrows(-Tkoor4,1);
    sort4=flipud(-sortrows(-Tkoor4,1));
  end
end

```



```

tt=0;
ttttt1=0;
ttttt2=0;
ttttt3=0;
ttttt4=0;
g=0;
sss1=1
sss2=1
sss3=1
sss4=1
    if sort1(4,1)<1950
        m=0
        for sss=1:80
            if sort1(sss,3)>=8
                for ssss=1:3
                    if m==0
                        if sort2(sssss,1)>1950
sort2(sssss,,:)=sort1(sss,,:);
sort1(sss,,:)=[];
                            m=1;
                            g=1;
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
    if sort1(4,1)<1950
        m=0;
        for sss=1:80
            if sort1(sss,2)>=4
                for ssss=1:3
                    if m==0
                        if sort3(sssss,1)>1950
sort3(sssss,,:)=sort1(sss,,:);
sort1(sss,,:)=[];
                            m=1;
                            g=2;
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
    if sort2(4,1)<1950
        m=0;
        for sss=1:80
            if sort2(sss,3)<=24
                for ssss=1:3
                    if m==0
                        if sort1(sssss,1)>1950
                            sort1(sssss,,:)=sort2(sss,,:);
                            sort2(sss,,:)=[];
                            m=1;
                            g=3;
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
    if sort2(4,1)<1950
        m=0;

```

```

        for sss=1:80
            if sort2(sss,2)>=4
                for ssss=1:3
                    if m==0
                        if sort4(sssss,1)>1950
sort4(sssss,,:)=sort2(sss,,:);
sort2(sss,,:)=[];
                            m=1;
                            g=4;
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
    if sort3(4,1)<1950
        m=0;
        for sss=1:80
            if sort3(sss,3)>=8
                for ssss=1:3
                    if m==0
                        if sort4(sssss,1)>1950
sort4(sssss,,:)=sort3(sss,,:);
sort3(sss,,:)=[];
                            m=1;
                            g=5;
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
    if sort3(4,1)<1950
        m=0;
        for sss=1:80
            if sort3(sss,2)<=9
                for ssss=1:3
                    if m==0
                        if sort1(sssss,1)>1950
sort1(sssss,,:)=sort3(sss,,:);
sort3(sss,,:)=[];
                            m=1;
                            g=6;
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
    if sort4(4,1)<1950
        m=0;
        for sss=1:80
            if sort4(sss,3)<=24
                for ssss=1:3
                    if m==0
                        if sort3(sssss,1)>1950
sort3(sssss,,:)=sort4(sss,,:);
sort4(sss,,:)=[];
                            m=1;
                            g=7;
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end

```

```

end
end
end
if sort4(4,1)<1950
    m=0;
    for sss=1:80
        if sort4(sss,2)<=9
            for ssss=1:3
                if m==0
                    if sort2(sssss,1)>1950
sort2(sssss,:)=sort4(sss,:);
sort4(sss,:)=[];
                    m=1;
                    g=8;
                end
            end
        end
    end
end
end
NNN1= sort1(1:3,2:3);
NNN2= sort2(1:3,2:3);
NNN3= sort3(1:3,2:3);
NNN4= sort4(1:3,2:3);
end
if (sort1(sss1,1)>1950 & tttt1==0) |
sss1>3
    if NN(nnn1,1)==1
L(NN(nnn1,2)*25+1:NN(nnn1,2)*25+26,NN(nnn1,
1)*25-24:NN(nnn1,1)*25-12)=L3;
        elseif NN(nnn1,1)>1 & NN(nnn1,1)<8
L(NN(nnn1,2)*25+1:NN(nnn1,2)*25+26,NN(nnn1,
1)*25-49:NN(nnn1,1)*25-24)=L1;
        end
        if tttt1==0
            nnn1=nnn1+1;
        end
    elseif sort1(sss1,1)<1950 & tttt1==0 &
sss1<4
        tttt1=1
    end
    if sss1<=3
        if NNN1(sss1,1)>1
            if tttt1==1
L(NNN1(sss1,2)*25+1:NNN1(sss1,2)*25+26,NNN
1(sss1,1)*25-24:NNN1(sss1,1)*25+1)=L1;
            elseif tttt1==2
                L(NNN1(sss1,2)*25-
12:NNN1(sss1,2)*25+13,NNN1(sss1,1)*25-
37:NNN1(sss1,1)*25-12)=L1;
            elseif tttt1==3
L(NNN1(sss1,2)*25+14:NNN1(sss1,2)*25+39,NN
N1(sss1,1)*25-37:NNN1(sss1,1)*25-12)=L1;
            elseif tttt1==4
                L(NNN1(sss1,2)*25-
12:NNN1(sss1,2)*25+13,NNN1(sss1,1)*25-
11:NNN1(sss1,1)*25+14)=L1;
            elseif tttt1==5
L(NNN1(sss1,2)*25+14:NNN1(sss1,2)*25+39,NN
N1(sss1,1)*25-11:NNN1(sss1,1)*25+14)=L1;
            end
        elseif NNN1(sss1,1)==1

```

```

        if tttt1==1
L(NNN1(sss1,2)*25+1:NNN1(sss1,2)*25+26,NNN
1(sss1,1)*25-24:NNN1(sss1,1)*25+1)=L1;
        elseif tttt1==2
            L(NNN1(sss1,2)*25-
12:NNN1(sss1,2)*25+13,NNN1(sss1,1)*25-
24:NNN1(sss1,1)*25-12)=L3;
        elseif tttt1==3
L(NNN1(sss1,2)*25+14:NNN1(sss1,2)*25+39,NN
N1(sss1,1)*25-24:NNN1(sss1,1)*25-12)=L3;
        elseif tttt1==4
            L(NNN1(sss1,2)*25-
12:NNN1(sss1,2)*25+13,NNN1(sss1,1)*25-
11:NNN1(sss1,1)*25+14)=L1;
        elseif tttt1==5
L(NNN1(sss1,2)*25+14:NNN1(sss1,2)*25+39,NN
N1(sss1,1)*25-11:NNN1(sss1,1)*25+14)=L1;
        end
    end
end
end
if tttt1>0
    tttt1=tttt1+1;
end
if tttt1==6
    sss1=sss1+1;
    tttt1=0;
    tttt1
end
if (sort2(sss2,1)>1950 & tttt2==0) | sss2>3
    if NN(nnn2,1)==1
L(NN(nnn2,2)*25+376:NN(nnn2,2)*25+401,NN(nn
n2,1)*25-24:NN(nnn2,1)*25-12)=L3;
        elseif NN(nnn2,1)>1 & NN(nnn2,1)<8
L(NN(nnn2,2)*25+376:NN(nnn2,2)*25+401,NN(nn
n2,1)*25-49:NN(nnn2,1)*25-24)=L1;
        end
        if tttt2==0
            nnn2=nnn2+1;
        end
    elseif sort2(sss2,1)<1950 & tttt2==0 &
sss2<4
        tttt2=1
    end
    if sss2<=3
        if NNN2(sss2,1)>1
            if tttt2==1
L(NNN2(sss2,2)*25+1:NNN2(sss2,2)*25+26,NNN
2(sss2,1)*25-24:NNN2(sss2,1)*25+1)=L1;
            elseif tttt2==2
                L(NNN2(sss2,2)*25-
12:NNN2(sss2,2)*25+13,NNN2(sss2,1)*25-
37:NNN2(sss2,1)*25-12)=L1;
            elseif tttt2==3
L(NNN2(sss2,2)*25+14:NNN2(sss2,2)*25+39,NN
N2(sss2,1)*25-37:NNN2(sss2,1)*25-12)=L1;
            elseif tttt2==4
                L(NNN2(sss2,2)*25-
12:NNN2(sss2,2)*25+13,NNN2(sss2,1)*25-
11:NNN2(sss2,1)*25+14)=L1;
            elseif tttt2==5
L(NNN2(sss2,2)*25+14:NNN2(sss2,2)*25+39,NN
N2(sss2,1)*25-11:NNN2(sss2,1)*25+14)=L1;

```

```

end
elseif NNN2(sss2,1)==1
  if tttt2==1
    L(NNN2(sss2,2)*25-
24:NNN2(sss2,2)*25+1,NNN2(sss2,1)*25+1:NNN
2(sss2,1)*25+26)=L1;
  elseif tttt2==2
    L(NNN2(sss2,2)*25-
12:NNN2(sss2,2)*25+13,NNN2(sss2,1)*25-
24:NNN2(sss2,1)*25-12)=L3;
  elseif tttt2==3
    L(NNN2(sss2,2)*25+14:NNN2(sss2,2)*25+39,NN
N2(sss2,1)*25-24:NNN2(sss2,1)*25-12)=L3;
  elseif tttt2==4
    L(NNN2(sss2,2)*25-
11:NNN2(sss2,2)*25+14,NNN2(sss2,1)*25-
12:NNN2(sss2,1)*25+13)=L1;
  elseif tttt2==5
    L(NNN2(sss2,2)*25-
11:NNN2(sss2,2)*25+14,NNN2(sss2,1)*25+14:N
NN2(sss2,1)*25+39)=L1;
  end
end
end

if tttt2>0
  tttt2=tttt2+1;
end
if tttt2==6
  sss2=sss2+1;
  tttt2=0;
  tttt2
end
if (sort3(sss3,1)>1950 & tttt3==0) | sss3>3
  if NN(nnn3,1)==1
    L(NN(nnn3,2)*25+1:NN(nnn3,2)*25+26,314-
NN(nnn3,1)*25:326-NN(nnn3,1)*25)=L2;
    elseif NN(nnn3,1)>1 & NN(nnn3,1)<8
    L(NN(nnn3,2)*25+1:NN(nnn3,2)*25+26, 326-
NN(nnn3,1)*25:351-NN(nnn3,1)*25)=L1;
    end
    if tttt3==0
      nnn3=nnn3+1;
    end
  elseif sort3(sss3,1)<1950 & tttt3==0 & sss3<4
    tttt3=1
    end
    if sss3<=3
      if NNN3(sss3,1)<12
        if tttt3==1
          L(NNN3(sss3,2)*25+1:NNN3(sss3,2)*25+26,NNN
3(sss3,1)*25-24:NNN3(sss3,1)*25+1)=L1;
        elseif tttt3==2
          L(NNN3(sss3,2)*25-
12:NNN3(sss3,2)*25+13,NNN3(sss3,1)*25-
37:NNN3(sss3,1)*25-12)=L1;
        elseif tttt3==3
          L(NNN3(sss3,2)*25+14:NNN3(sss3,2)*25+39,NN
N3(sss3,1)*25-37:NNN3(sss3,1)*25-12)=L1;
        elseif tttt3==4

```

```

L(NNN3(sss3,2)*25-
12:NNN3(sss3,2)*25+13,NNN3(sss3,1)*25-
11:NNN3(sss3,1)*25+14)=L1;
    elseif tttt3==5
      L(NNN3(sss3,2)*25+14:NNN3(sss3,2)*25+39,NN
N3(sss3,1)*25-11:NNN3(sss3,1)*25+14)=L1;
    end
    elseif NNN3(sss3,1)==12
      if tttt3==1
        L(NNN3(sss3,2)*25+1:NNN3(sss3,2)*25+26,NNN
3(sss3,1)*25-24:NNN3(sss3,1)*25+1)=L1;
      elseif tttt3==2
        L(NNN3(sss3,2)*25-
12:NNN3(sss3,2)*25+13,NNN3(sss3,1)*25-
37:NNN3(sss3,1)*25-12)=L1;
      elseif tttt3==3
        L(NNN3(sss3,2)*25+14:NNN3(sss3,2)*25+39,NN
N3(sss3,1)*25-37:NNN3(sss3,1)*25-12)=L1;
      elseif tttt3==4
        L(NNN3(sss3,2)*25-
12:NNN3(sss3,2)*25+13,NNN3(sss3,1)*25-
11:NNN3(sss3,1)*25+1)=L2;
      elseif tttt3==5
        L(NNN3(sss3,2)*25+14:NNN3(sss3,2)*25+39,NN
N3(sss3,1)*25-11:NNN3(sss3,1)*25+1)=L2;
      end
    end
    end
    if tttt3>0
      tttt3=tttt3+1;
    end
    if tttt3==6
      sss3=sss3+1;
      tttt3=0;
      tttt3
    end
    if (sort4(sss4,1)>1950 & tttt4==0) |
sss4>3
      if NN(nnn4,1)==1
        L(NN(nnn4,2)*25+376:NN(nnn4,2)*25+401,314-
NN(nnn4,1)*25:326-NN(nnn4,1)*25)=L2;
        elseif NN(nnn4,1)>1 & NN(nnn4,1)<8
        L(NN(nnn4,2)*25+376:NN(nnn4,2)*25+401, 326-
NN(nnn4,1)*25:351-NN(nnn4,1)*25)=L1;
        end
        if tttt4==0
          nnn4=nnn4+1;
        end
        elseif sort4(sss4,1)<1950 & tttt4==0 &
sss4<4
          tttt4=1
          end
          if sss4<=3
            if NNN4(sss4,1)<12
              if tttt4==1
                L(NNN4(sss4,2)*25+1:NNN4(sss4,2)*25+26,NNN
4(sss4,1)*25-24:NNN4(sss4,1)*25+1)=L1;
              elseif tttt4==2
                L(NNN4(sss4,2)*25-
12:NNN4(sss4,2)*25+13,NNN4(sss4,1)*25-
37:NNN4(sss4,1)*25-12)=L1;

```

```

elseif tttt4==3
L(NNN4(sss4,2)*25+14:NNN4(sss4,2)*25+39,NN
N4(sss4,1)*25-37:NNN4(sss4,1)*25-12)=L1;
elseif tttt4==4
L(NNN4(sss4,2)*25-
12:NNN4(sss4,2)*25+13,NNN4(sss4,1)*25-
11:NNN4(sss4,1)*25+14)=L1;
elseif tttt4==5
L(NNN4(sss4,2)*25+14:NNN4(sss4,2)*25+39,NN
N4(sss4,1)*25-11:NNN4(sss4,1)*25+14)=L1;
end
elseif NNN4(sss4,1)==12 & sss4<=3
if tttt4==1
L(NNN4(sss4,2)*25+1:NNN4(sss4,2)*25+26,NNN
4(sss4,1)*25-24:NNN4(sss4,1)*25+1)=L1;
elseif tttt4==2
L(NNN4(sss4,2)*25-
12:NNN4(sss4,2)*25+13,NNN4(sss4,1)*25-
37:NNN4(sss4,1)*25-12)=L1;
elseif tttt4==3
L(NNN4(sss4,2)*25+14:NNN4(sss4,2)*25+39,NN
N4(sss4,1)*25-37:NNN4(sss4,1)*25-12)=L1;
elseif tttt4==4
L(NNN4(sss4,2)*25-
12:NNN4(sss4,2)*25+13,NNN4(sss4,1)*25-
11:NNN4(sss4,1)*25+1)=L2;
elseif tttt4==5
(NNN4(sss4,2)*25+14:NNN4(sss4,2)*25+39,NNN
4(sss4,2)*25-11:NNN4(sss4,2)*25+1)=L2;
end
end
end
if tttt4>0
tttt4=tttt4+1;
end
if tttt4==6
sss4=sss4+1;
tttt4=0;
tttt4
end
if nnn1==106
nnn1=1;
end
if nnn2==106
nnn2=1;
end
if nnn3==106
nnn3=1;
end
if nnn4==106
nnn4=1;
end
for k=2:kmax-1
for j=2:jmax-1
SI=T(:,j,k);
AI1=diag(AI,-1);
AI2=diag(AI);
AI3=diag(AI,1);
VI=BI+DI*SI;
AI3z=zeros(1,imax);
VIz=zeros(1,imax);
AI3z(1)=AI3(1)/AI2(1);
for w=1:imax-2

```

```

AI3z(w+1)=AI3(w+1)/(AI2(w+1)-
AI1(w)*AI3z(w));
end
VIz(1)=VI(1)/AI2(1);
for w=1:imax-1
VIz(w+1)=(VI(w+1)-AI1(w)*VIz(w))/(AI2(w+1)-
AI1(w)*AI3z(w));
end
SI(imax)=VIz(imax);
for w=imax-1:-1:1
SI(w)=VIz(w)-AI3z(w)*SI(w+1);
end
T(:,j,k)=SI;
end
end
for i=2:imax-1
for k=2:kmax-1
SJ=T(i,.,k)';
AJ1=diag(AJ,-1);
AJ2=diag(AJ);
AJ3=diag(AJ,1);
VJ=BJ+DJ*SJ;
AJ3z=zeros(1,jmax);
VJz=zeros(1,jmax);
AJ3z(1)=AJ3(1)/AJ2(1);
for w=1:jmax-2
AJ3z(w+1)=AJ3(w+1)/(AJ2(w+1)-
AJ1(w)*AJ3z(w));
end
VJz(1)=VJ(1)/AJ2(1);
for w=1:jmax-1
VJz(w+1)=(VJ(w+1)-
AJ1(w)*VJz(w))/(AJ2(w+1)-AJ1(w)*AJ3z(w));
end
SJ(jmax)=VJz(jmax);
for w=jmax-1:-1:1
SJ(w)=VJz(w)-AJ3z(w)*SJ(w+1);
end
SJ=SJ';
T(i,.,k)=SJ;
end
end
for i=1:imax
for j=1:jmax
SK=T(i,j,:);
if i<13 & j<13
Tsrds=mean(mean(T(1:26,1:26)));
end
if i>13 & i<782 & j<13
Tsrds=mean(mean(T(i-13:i+13,1:26)));
end
if i>282 & j<13
Tsrds=mean(mean(T(776:801,1:26)));
end
if i<13 & j>13 & j<282
Tsrds=mean(mean(T(1:26,j-13:j+13)));
end
if i>13 & i<82 & j>13 & j<282
Tsrds=mean(mean(T(i-13:i+13,j-13:j+13)));
end
if i>782 & j>13 & j<282
Tsrds=mean(mean(T(776:801,j-13:j+13)));
end
end

```

```

if i<13 & j>282
    Tsrd=mean(mean(T(1:26,276:301)));
end
if i>13 & i<782 & j>282
    Tsrd=mean(mean(T(i-13:i+13,276:301)));
end
if i>782 & j>282
    Tsrd=mean(mean(T(776:801,276:301)));
end
    ll=L(i,j);
    Grad=ee*sgm*dz*(Tsrd^4- 300^4);
    BK(kmax,1)=-dz*ceil(ll)*q*exp(-
ka*ll^2)+(floor(1-ll))*Grad;
    for x=1:kmax
        SKK(x,1)=SK(:,x);
    end
    AK1=diag(AK,-1);
AK2=diag(AK);
AK3=diag(AK,1);
VK=BK+DK*SKK;
AK3z=zeros(1,kmax);
VKz=zeros(1,kmax);
AK3z(1)=AK3(1)/AK2(1);
for w=1:kmax-2
    K3z(w+1)=AK3(w+1)/(AK2(w+1)-
AK1(w)*AK3z(w));
end
VKz(1)=VK(1)/AK2(1);
for w=1:kmax-1
    VKz(w+1)=(VK(w+1)-
AK1(w)*VKz(w))/(AK2(w+1)-AK1(w)*AK3z(w));
end
SKK(kmax)=VKz(kmax);
for w=kmax-1:-1:1
    SKK(w)=VKz(w)-AK3z(w)*SKK(w+1);
end
for x=1:kmax
    SK(:,x)=SKK(x,1);
end
T(i,j,:)=SK;
end
end
T(1,:)=To;
fff=fix(ff/fpr);
ccc=fix(cc/cpr);
if fff==1
for j=1:jmax
    for k=1:kmax
        if T(imax,j,k)>1950
            gar=gar+1;
        end
    end
end
gar
Gar=(gar/((jmax-1)*(kmax-1)))*(jmax-1)*(kmax-
1)*0.001^3*4120
Gtit=Gtit+Gar
GGtit=GGtit+Gar
GAR(1,:)=ff/fpr;
GAR(2,:)=gar;
gar=0;
T1=T;
for i=imax:-1:2

```

```

for k=2:kmax
    for j=2:jmax
        T1(i,j,k)=T(i-1,j,k);
    end
end
end
ff=0;
T=T1;
TS=T;
end
if ccc==1
    T1=T;
    for j=2:(jmax-1)/2
for k=2:kmax
    for i=2:imax
        T1(i,j,k)=T(i,j-1,k);
    end
end
end
        for j=(jmax-1)/2:jmax-1
for k=2:kmax
    for i=2:imax
        T1(i,j,k)=T(i,j+1,k);
    end
end
end
        cc=0;
        T=T1;
        for xk=1:2
            for yk=1:8
                yn=randi([1 20]);
                yf=randi([80 100]);
                kf=randi([10 15]);
                for k=1:kf
                    T(((yk-1)*100+yn):((yk-1)*100+yf),(301-
300*(2-xk)),k)=300;
                end
            end
        end
end
end
if f/150==fix(f/150)
    QGtit(:,f/150)= 3600*GGtit/5;
end
if QGtit(:,f/150)>=400 & QGtit(:,f/150)<=750
    vh=vh+0.5;
elseif QGtit<400 & vh>1
    vh=vh-0.5;
end
vv=vh*5;
cpr=fix(1/(dt*vh));
fpr=fix(1/(dt*vv));
ff=0;
cc=0;
GGtit=0;
end
tt=tt+1;
ff=ff+1;
cc=cc+1;
ttt1=fix(ffff/ttt1);
if ttt1==1
    xl=randi([25 350]);
    yb=randi([25 125]);
    zk=randi([1 10]);

```

```

    T(xl:xl+randi([25 45]),yb:yb+randi([25
45]),kmax-zk:kmax)=300;
    ttt1=randi([450 600])
    ffff1=0;
end
    ttt2=fix(ffff2/ttt2);
if ttt2==1
    xl=randi([400 750]);
    yb=randi([25 125]);
    zk=randi([1 10]);
    T(xl:xl+randi([25 45]),yb:yb+randi([25
45]),kmax-zk:kmax)=300;
    ttt2=randi([450 600])
    ffff2=0;
end
    ttt3=fix(ffff3/ttt3);
if ttt3==1
    xl=randi([25 350]);
    yb=randi([150 250]);
    zk=randi([1 10]);
    T(xl:xl+randi([25 45]),yb:yb+randi([25
45]),kmax-zk:kmax)=300;

```

```

    ttt3=randi([450 600])
    ffff3=0;
end
    ttt4=fix(ffff4/ttt4);
if ttt4==1
    xl=randi([400 750]);
    yb=randi([150 250]);
    zk=randi([1 10]);
    T(xl:xl+randi([25 45]),yb:yb+randi([25
45]),kmax-zk:kmax)=300;
    ttt4=randi([450 600])
    ffff4=0;
end
    ffff1=ffff1+1;
    ffff2=ffff2+1;
    ffff3=ffff3+1;
    ffff4=ffff4+1;
end
toc
[ii,jj]=meshgrid(0:1:jmax-1,0:1:imax-1);
surf(ii,jj,T(:, :, kmax))
shading flat

```

ДОДАТОК Ж. Акти впровадження



Проректор з наукової роботи
Національного авіаційного
університету
проф. Харченко В.П.
“20” “10” 2017 р.



АКТ

про впровадження у навчальний процес результатів досліджень Цибрія Юрія Олександровича за темою дисертаційної роботи „Механотронна система керування виплавою титану ”

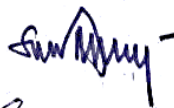
На основі матеріалів дисертаційної роботи Цибрія Ю.О., на прикладі розрахунку мембранних приводів на втомну міцність студентам представлено методика розрахунку напружень в деталях механізмів та машин із застосуванням методу скінченних елементів та САЕ програмних пакетів.

Досліджено вплив геометричних параметрів деталей мембранного приводу на його ресурс спрацювання; запропонована інженерна методика вибору раціональних геометричних параметрів мембранних приводів.

Матеріали досліджень використані у навчальному процесі при викладанні дисциплін „Details of Machines” та „Основи конструювання” для студентів спеціальностей 6.070103-1a/2a «Обслуговування повітряних суден» та 6.050604 «Енергомашинобудування» відповідно.

Акт обговорений і схвалений на засіданні кафедри машинознавства НН Акі (протокол № 11 від 23 жовтня 2017 р.).

Завідувач кафедри машинознавства НН Акі,
д.т.н., професор



М.В. Кіндрачук

Секретар кафедри, к.т.н., доцент



О.В. Башта

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з науково-педагогічної
та міжнародної діяльності КНУТД
д.т.н., проф. Чабан В.В.



2017 р.

АКТ

впровадження результатів кандидатської дисертації на тему: «Механотронна

система керування виплавною титану»

завідуючого лабораторії кафедри машинознавства

Національного авіаційного університету

Цибрія Юрія Олександровича

Результати, які отримані в дисертації, поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.02 «Машинознавство» завідуючим лабораторією кафедри машинознавства Національного авіаційного університету Цибрія Юрія Олександровича впроваджені у навчальний процес кафедри прикладної механіки та машин КНУТД при виконанні лабораторних робіт з дисциплін «Мехатроніка в галузевому машинобудуванні» та «САМ-технології комп'ютерно-інтегрованого обладнання».

Завідувач кафедрою
прикладної механіки та машин
к.т.н., доц.

О.П. Манойленко

“Затверджую”
Перший проректор
КНУ ім. Ігоря Сікорського
Якименко Ю.І.
“27” 11 2017 р.

АКТ

використання результатів дисертаційної роботи Цибрія Ю.О. за темою «Механотронна система керування виплавною титану», поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.02 - Машинознавство.

Акт складено з приводу впровадження результатів дисертаційної роботи Цибрія Юрія Олександровича у навчальний процес кафедри прикладної гідроаеромеханіки та механотроніки.

У навчальний процес впроваджені матеріали п'ятого розділу дисертації, які стосуються створення загальної мехатронної системи керування виплавною титану. Вказані матеріали використанні у лекційному курсі «Особливості проектування систем гідроавтоматики».

Матеріали третього та п'ятого розділів дисертації у частині розробки алгоритмів підсистеми керування траєкторією руху електронного променя при обігріві проміжної ємності зі зворотним зв'язком по температурі використанні в курсі лабораторних робіт з дисципліни «Мікропроцесорне управління мехатронних модулів та систем».

Завідувач кафедри
прикладної гідроаеромеханіки та механотроніки
доктор технічних наук, професор



О.Ф. Луговський

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ "Стратегія БМ"

Телін В.В.

23.11.2017



АКТ

про передачу математичної моделі процесу плавки титану в проміжній ємності та алгоритму керування траєкторією руху електронного променя.

Наведений акт складено в тому, що розроблена здобувачем НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» Цибрієм Ю.О. математична модель процесу плавки титану в проміжній ємності та алгоритм керування траєкторією руху електронного променя передані ТОВ " Стратегія БМ " для використання в розробках підприємства.

Математична модель враховує нестационарність процесів тепло-масообміну в проміжній ємності, а в алгоритмі керування траєкторією руху електронного променя може бути використано зворотній зв'язок по температурі розплаву в проміжній ємності.

Пропозиції здобувача використані в роботі електронно-променевої установки ТІСО-15М.

Головний технолог

 Дереча О.Я.


Від НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Професор кафедри прикладної
гідроаеромеханіки та механотроніки

 Грабовський Г.Г.

Здобувач кафедри прикладної
гідроаеромеханіки та механотроніки

 Цибрій Ю.О.

**ЗАТВЕРДЖУЮ**
Директор ДП НВЦ «Титан»
ІЕЗ ім. Є.О. Патона
НАН України
член-кор НАНУ, д.т.н., проф.
 С.В. Ахонін
“22” 2017 р.


АКТ


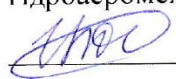
про передачу алгоритму керування траєкторією руху електронного променя при
одночасній роботі декількох електронно-променевиx гармат

Наведений акт складено в тому, що запропонований здобувачем НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» Цибрієм Ю.О алгоритм керування траєкторією руху електронного променя при одночасній роботі декількох електронно-променевиx гармат, розроблений при виконанні дисертації «Механотронна система керування виплавою титану», передано ДП НВЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України для використання в розробках підприємства при виплавці титанових зливків.

Переданий алгоритм керування траєкторією руху електронного променя при одночасній роботі декількох електронно-променевиx гармат, який враховує зворотній зв'язок по температурі розплаву в проміжній ємності, забезпечує перерозподіл зон дії електронно-променевиx гармат для рівномірного розподілу потужності обігріву розплаву в проміжній ємності.

Пропозиції здобувача враховані при виплавці титанових зливків на установці УЭ-5812.

Від ДП НВЦ «Титан»
Зав. відділом електронно-променевої плавки
кольорових металів та їх сплавів, к.т.н., с.н.с.
 В.О. Березос

Від НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
Професор кафедри прикладної
гідроаеромеханіки і механотроніки
 Г.Г. Грабовський
Здобувач кафедри прикладної
гідроаеромеханіки і механотроніки
 Ю.О. Цибрій

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор ДНВК «КІА»

Ю.Б. Давидовський



2017р.

Акт



Про впровадження в науково – дослідний процес результатів дисертаційної роботи Цибрія Юрія Олександровича на тему «Механотронна система керування виплавною титану»

Комісія у складі:

голови: Степанова Анатолія Аркадійовича - головного інженера

членів комісії: Мастеренко Валентина Мартиновича – зав. відділенням
Варавви Віталія Ігоровича - зав. відділом

склала цей акт про впровадження в науково – дослідницький процес інженерної методики вибору раціональних геометричних параметрів приводу подачі коливачів.

Місце впровадження - ДНВК «КІА»

Склад впровадження:

Методика визначення раціональних геометричних параметрів гідравлічного мембранного виконавчого приводу, у тому числі:

- математична модель кінцево-елементного аналізу одно – та двофазової мембрани при заданих граничних умовах навантаження та закріплення;
- аналітичні залежності максимального напруження в мембрані від її геометричних параметрів;
- алгоритм визначення області допустимих геометричних параметрів гідравлічного мембранного виконавчого механізму при заданій амплітуді та ресурсі спрацювань;
- раціональні значення геометричних параметрів мембрани гідравлічного мембранного виконавчого механізму з урахуванням конструкторських та технологічних обмежень (по сортаменту матеріалу мембрани, габаритним та приєднувальним розмірам мембрани).

Наведена вище методика була використана для розрахунку гідравлічних мембранних механізмів запроваджених на Ташкентському трубному заводі.

Голова комісії:  Степанов А.А.

Члени комісії:  Мастеренко В.М.

Варавва В.І.