

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ ІМ. З.І. НЕКРАСОВА НАЦІОНАЛЬНОЇ
АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

АРЕНДАЧ НАТАЛЯ АНАТОЛІЇВНА

УДК.669.141.245,
669.184.244.66:669.184.235.083.133

ДИСЕРТАЦІЯ

**РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАСАД ОКИСЛЮВАЛЬНОЇ
ПРОДУВКИ В СТАЛЕРОЗЛИВНОМУ КОВШІ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ
СТАЛІ З НИЗЬКИМ ВМІСТОМ ВУГЛЕЦЮ**

Спеціальність 136 – Металургія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ Н.А. Арендач

Науковий керівник:
Молчанов Лавр Сергійович
кандидат технічних наук

Дніпро – 2025

АНОТАЦІЯ

Арендас Н.А. Розробка технологічних засад окислювальної продувки в сталерозливному ковші при виробництві сталі з низьким вмістом вуглецю. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 136 – *Металургія*. – Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України, Дніпро, 2025.

У дисертаційній роботі представлено результати огляду джерел сучасної науково-технічної бази щодо ехнологічних аспектів виробництва сталей з вмістом вуглецю нижче 0,1%. Встановлено, що технологій з виплавки сталей з вмістом вуглецю нижче 0,1 % у кисневих конвертерах з подачею нейтрального газу з низу, а основного кисню зверху, які використовуються на сучасних металургійних підприємствах, супроводжуються зниженням виходу придатного рідкої сталі у порівнянні з виробництвом сталей вуглецевого сортаменту. Що стосується технології газо-кисневого рафінування, то вона базується на подаванні технологічних газів з нижньої частини сталеплавильного агрегату, зокрема через дно для ГКР процесу та з бокової сторони ванни – для AOD. При цьому використовуються фурми спеціальної конструкції «труба у трубі», які забезпечують введення кисню у металеву ванну в оболонці з палива, виключаючи високотемпературний вплив зони окислення на футерівку. При цьому технологія газокисневого рафінування передбачає чергування продувки металеві ванни киснем та нейтральним газом, що забезпечує уникнення переокислення металу та відповідно забезпечення високого рівня виходу придатного рідкої сталі. Використання методів окислювальної продувки на етапі вакуумування сталі є найбільш ефективним методом зниження вмісту вуглецю нижче концентрації 0,1%. Це зумовлено саме значним впливом зовнішнього тиску на процеси окислення (моноксид вуглецю є газоподібною речовиною). Суттєвим недоліком процесів видалення вуглецю з металевого розплаву нижче 0,1 %, що базуються на

процесах газо-кисневого рафінування, є використання спеціального технологічного обладнання, встановлення якого потребує значних капіталовкладень. Що стосується процесів окислення вуглецю киснем при пониженому тиску, то вони масово не застосовуються через невелику стійкість вузлів підводу кисню у розплав. Підтверджена доцільність виділення двох етапів у процесі виробництва сталей з вмістом вуглецю менше 0,1%: видалення вуглецю з розплаву до рівня 0,2% у процесі виплавки; досягнення концентрації вуглецю нижче 0,1% за рахунок доведення металу на етапі позапічної обробки сталі.

Проведено термодинамічні розрахунки процесу окислення домішок залізовуглецевого розплаву за рахунок донної продувки кисеньвмістною газовою фазою, які дозволили встановити черговість та пріоритетність процесів окислення у металевій ванні й вплив на них надмірного тиску. Таким чином, підтверджена теоретична можливість ефективного видалення вуглецю на етапі позапічної обробки сталі за рахунок донної продувки кисеньвмістним газом у бульбашковому режимі.

Шляхом проведення комплексного дослідження, яке передбачало використання методів тіньової зйомки та низькотемпературного моделювання, була визначена раціональна конструкція донного продувного блоку для введення кисеньвмістної газової фази в об'єм металевого розплаву. Встановлено, що продувний блок розробленої конструкції повинен складатися: з каналів для підведення технологічних газів, камери-змішувача технологічних газів, бульбашкоутворювача для надання газовій фазі більшої поверхні контакту з металом. Щодо кожного з елементів продувного блоку встановлені раціональні параметри: найбільш ефективною конструкцією бульбашкоутворювача в складі донного пристрою для продування розплавів є використання матеріалів з неорієнтованою пористістю та щілинною пористістю з шириною щілин 1-2 мм, використання яких дозволяє отримати стабільний стовп дрібних бульбашок, що скорочує час гомогенізації розплав; відповідно до емпірично отриманих результатів канали для ведення різних

продувних газів в камеру повинні знаходитися під кутом до вертикальної вісі в межах 25- 40°. Конструкція розробленого донного блоку для продувки металевого розплаву сумішшю технологічних газів у ковші захищена патентом України на корисну модель № 1226453 «Вогнетривкий блок для продувки металу газами».

Проведені дослідження на натурній холодній моделі сталерозливного ковша щодо розчинення «важких» присадок речовин при продуванні крізь донну фурму за бульбашковим режимом з метою встановлення особливостей масообмінних процесів. За їх результатами було встановлено, що під час продувки крізь блок з ненаправленою пористістю формується потік бульбашок, який не тільки підіймається вгору під дією сил Архімеда, але й створює додатковий рух середовища в прилеглих до потоку бульбашок шарах ванни; під час продувки у бульбашковому режимі найбільша зміна концентрації за час продувки відбувається в серединному об'ємі ванни ковша; найкращі умови перемішування ванни та найкоротший час її гомогенізації створюються при продуванні з інтенсивністю подачі продувного газу 0,684-1,026 м³/т·сталі год; найкращі умови щодо коливання рідкої ванни, які не повинні утворювати ділянки оголеного металу під час продувки, створюються при інтенсивності введення продувного газу 0,684-1,026 м³/т сталі·год; за відведений при виконанні досліджень час продувки заплановану концентрацію розчину 1% було досягнуто при інтенсивності введення у ванну газу 1,026 -1,368 м³/т·сталі год, при більш швидкому досягненні «гомогенного» стану рідкої ванни при інтенсивності подачі газу 1,026 м³/т·сталі год. Тобто рекомендацією для продування ванни у сталерозливному ковші крізь донний блок з ненаправленою пористістю у бульбашковому режимі для здійснення процесу знеуглецювання розплаву є продувка з інтенсивністю введення газу на рівні 0,36 м³/т сталі·год (при перерахуванні на реальний промисловий об'єкт – сталерозливний ківш ємністю 250т).

За результатами високотемпературного моделювання процесу продувки залізовуглецевого розплаву з невеликим вмістом вуглецю (0,3%мас) сумішшю кисень – нейтральний газ через одинарний продувний канал, що імітує бульбашковий режим донної продувки, встановлено, що раціональним з точки зору окислення вуглецю та експлуатації продувних пристроїв є вміст у газовій суміші кисню 20-30%. При цьому процес окислення відбувається зі швидкістю 0,056%мас/хв і супроводжується пріоритетним окисленням вуглецю у багатоконпонентному залізовуглецевому розплаві.

Ключові слова: низьковуглецева сталь, донна продувка, газове бульбашкоутворення, донний продувний блок, позапічна обробка, сталь-ківш

SUMMARY

Arendach N.A. Development of technological foundations of oxidizing melt purging in a ladle during the production of low-carbon steels. - Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the Doctor of Philosophy degree in specialty 136 – Metallurgy. – Iron and steel Institute of Z.I. Nekrasov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, 2025.

The dissertation presents the results of a review of the sources of the modern scientific and technical base regarding the technological aspects of the production of steels with a carbon content below 0.1%. It was established that technologies for steels smelting with a carbon content less than 0.1% in oxygen converters with the top oxygen supply and the bottom supply of neutral gas are used at modern metallurgical enterprises. However, they are accompanied with a decrease in the yield of liquid steel in comparison with the production of middle carbon steels. As for gas-oxygen refining technologies, they are based on the supply of process gases from the lower part of the steelmaking unit, in particular through the bottom for the

GKR process and from the wall-side of the bath - for AOD. At the same time, nozzles of a special “pipe-in-pipe” design are used, which ensure the introduction of oxygen into the metal bath in the fuel shell, excluding the high-temperature influence of the oxidation zone on the lining. At the same time, the technology of gas-oxygen refining involves alternating purging of the metal bath with oxygen and neutral gas, which ensures the avoidance of overoxidation of the metal and, accordingly, ensures a high level of yield of suitable liquid steel. The use of oxidation blowing methods at the steel vacuuming stage is the most effective method of reducing the carbon content below a concentration of 0.1%. This is due to the significant influence of external pressure on oxidation processes (carbon monoxide is a gaseous substance). A significant drawback of processes for removing carbon from metal melt below 0.1%, based on gas-oxygen refining processes, is the use of special technological equipment installation of which requires significant capital investment.

As for the processes of carbon oxidation with oxygen under reduced pressure, they are not widely used due to the low stability of the nodes supplying oxygen to the melt. The expediency of separating two stages in the production process of steels with a carbon content less than 0.1% has been confirmed: removal of carbon from the melt to the level of 0.2% in the smelting process; achieving a carbon concentration below 0.1 due to metal treatment at the stage of out-of-furnace steel processing.

Thermodynamic calculations of the oxidation process of iron-carbon melt impurities due to bottom purging with an oxygen-containing gas phase were carried out. That made it possible to establish the sequence and priority of oxidation processes in a metal bath and the effect of excessive pressure on them. Thus, the theoretical possibility of effective carbon removal at the stage of out-of-furnace steel processing due to bottom purging with oxygen-containing gas in the bubbling mode has been confirmed.

By conducting a complex study, which involved the use of shadow photography and low-temperature modeling, a rational design of the bottom

purging unit for introducing an oxygen-containing gas phase into the volume of the metal melt was determined. It was established that the blowing unit of the developed design should consist of: channels for supplying process gases, a mixing chamber for process gases, the bubbler to give the gas phase a larger contact surface with the metal. Rational parameters were set for each element of the blowing block. The most effective design of the bubble generator as part of the bottom device for blowing melts is the use of materials of non-oriented porosity and slotted porosity with a width of the slit 1-2 mm. Their use allows you to obtain a stable column of small bubbles, due to which shortens the homogenization time of the melt. According to the empirically obtained results, the channels for supply various purging gases into the chamber should be at an angle to the vertical axis within 25-40°. The design of the developed bottom block for blowing the metal melt with a mixture of process gases in the ladle was protected by Ukrainian patent for utility model No. 1226453 “Refractory block for blowing metal with gases”.

Studies were conducted on a full-scale cold model of a steel casting ladle regarding the dissolution of “heavy” additives during purging through the bottom nozzle in the bubbling mode in order to establish the characteristics of mass transfer processes. According to their results, it was established that during purging through a block with non-directed porosity, a stream of bubbles is formed, which not only rises up under the action of Archimedean forces, but also creates additional movement of the area in the layers of the bath adjacent to the stream of bubbles. During purging in bubble mode, the largest concentration change occurs in the middle of the ladle bath. The best conditions for the bath mixing and the shortest time for its homogenization are created during purging with the intensity of the gas supply of 0.684-1.026 m³/t·steel h. The best conditions for the oscillation of the liquid bath, which should not form areas of bare metal during purging, are created at the intensity of the purging gas supply of 0.684-1.026 m³/t of steel·h. During the purging time the planned solution concentration of 1% was achieved at the intensity of gas supply into the bath of 1.026 -1.368 m³/t· steel h, with a faster achievement of the “homogeneous” state of the liquid bath at the intensity of gas

supply of $1.026 \text{ m}^3/\text{t} \cdot \text{steel hours}$. That is, the recommendation for purging the bath in a steel casting ladle through the bottom block with non-directional porosity in the bubble mode for the process of decarburization of the melt with the intensity of gas supply at the level of $0.36 \text{ m}^3/\text{t}$ of steel·h (when transferred to a real industrial object - steel casting ladle with a capacity of 250 tons).

According to the results of high-temperature modeling of the process of iron-carbon melt purging with a lower carbon content (0.3% by mass) with a mixture of oxygen and neutral gas through a single blowing channel (simulating the bubbling mode of bottom blowing), it was established that the rational from the point of view of carbon oxidation and the operation of purging devices is the oxygen content in the gas mixture is 20-30%. At the same time, the oxidation process occurs at a rate of 0.056 wt\%/min and is accompanied by priority oxidation of carbon in the multicomponent iron-carbon melt.

Key words: low-carbon steel, purging process, bubble gas formation, bottom purging unit, out-of-furnace treatment, ladle

Наукова новизна. Положення наукової новизни формують приведені у подальшому узагальнені результати теоретичних та експериментальних досліджень:

1. Отримали подальшого розвитку уявлення що до перебігу окислювальних реакцій в багатокомпонентних залізовуглецевих сплавах за рахунок кисеньвмісної газової фази та тиску на процеси окислення вуглецю на етапі позапічної обробки сталі. Встановлено, що вірогідність протікання реакцій розчинення кисню у розплаві та окислення вуглецю до СО збільшується на 19%відн. при збільшенні тиску у 34 рази за рахунок гідростатичного впливу шару металу та шлаку для сталерозливного ковша ємністю 250 т.

Термодинамічні дослідження процесів окислення складових домішок багатокомпонентних залізовуглецевих сплавів проводяться більше ніж 70 років. При цьому, здебільшого всі дослідження проводилися для етапів виготовлення сталі у плавильних агрегатах для умов взаємодії шлако-металевої емульсії з кисневими струменями, що витікають зі звуковою та понадзвуковою швидкістю. Також є певна кількість досліджень, яка висвітлює особливості окислення домішок багатокомпонентного залізовуглецевого розплаву при впливі зниженого тиску. Отримані залежності впливу гідростатичного тиску шару металу для умов сталерозливного ковша ємністю 250-т на вірогідність протікання процесів окислення домішок багатокомпонентного залізовуглецевого розплаву, відповідно до яких можна встановити пріоритетність процесів розчинення газоподібного кисню у розплаві та утворення СО за рахунок взаємодії розчиненого кисню з вуглецем розплаву.

2. За результатами фізичного моделювання при використанні методу тіньової зйомки вперше встановлено, що при взаємодії газових потоків, які витікають з однаковими газодинамічними характеристиками в порожнину камери змішування під кутом 25-40° до

вертикальній вісі камери, відбувається повне їх змішування без втрати швидкості потоку суміші газів.

Попередніми дослідженнями встановлено, що умовою змішування двох газових потоків є витікання вздовж однієї вісі назустріч один одному. При цьому відбувається асиміляція газових струменів за рахунок впровадження молекул газу одного потоку у інший з повною втратою швидкостей струменями. В ході проведення дослідження отримані методом тіньової зйомки фотографії взаємодії газових струменів, які дозволили встановити кути нахилу струменів до вертикалі, за яких спостерігається змішування потоків з мінімальними втратами швидкості (встановлено за характером та щільністю результуючого газового струменя, що відображається у формі та кольорі на фотографіях тіньової зйомки).

3. Для промислових умов обробки сталі у ковші ємністю 250-т за результатами низькотемпературного моделювання (рідина, що імітує сталь - вода), встановлено гідродинамічні особливості гомогенізації рідини в сталерозливному ковші при донній продувці сумішшю системи «кисень-нейтральний газ». Вперше встановлено, що за інтенсивності $1\text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ (за умов збільшення витрати продувального газу на 20% у порівнянні зі стандартною технологією) відбувається утворення тангенціальних потоків, які пульсують й залучають більшу частину ванни (~ на 52%) до перемішування та ~ на 42% скорочується тривалість усереднення хімічного складу рідини при додаванні у якости імітатора добавки, що розчиняється, хлориду натрію.

Низькотемпературне дослідження масообмінних процесів в сталерозливному ковші за рахунок продувки технологічними газами досліджується вже майже 70 років. При цьому є значні досягнення з визначення особливостей руху рідкої фази, встановлення швидкостей потоків та закономірностей розчинення феросплавних добавок. Серед дослідників цього напрямку особливе місце займають вітчизняні наукові школи ДДТУ (Самохвалов С.Є., Грес О.В.), ІЧМ (Віхлевщук В.А., Піптюк В.П.) та

ФТМС (Смірнов А.М.). Серед досягнень зазначених дослідницьких шкіл можна виділити: визначення гідродинамічних особливостей під час продувки у ковші на двофазній моделі; визначення раціональних режимів продувки та ділянок розташування донних продувних блоків; встановлення швидкостей потоків та розподілу температур і концентрацій у об'ємі ванни сталерозливного ковша; дослідження особливостей розчинення добавок у рідкій фазі. Проте необхідно відзначити, що відповідно до сучасних уявлень, представлених у останніх публікаціях як вітчизняних так і закордонних вчених пріоритетна роль в усередненні металевої ванни саме надається вертикальному руху рідини у ковші під час продувки нейтральним газом. Проте, в ході проведення досліджень доведено важливість впливу саме тангенційного руху бульбашкової продувки (у горизонтальній площини ванни) на ефективність процесів масообміну в металевій ванні.

4. За результатами лабораторного високотемпературного моделювання вперше встановлено, що за умов продувки металевого розплаву з вмістом вуглецю 0,3%мас. сумішшю системи «кисень-нейтральний газ» при вмісті кисню 20-30% спостерігається пріоритетне окислення вуглецю зі швидкістю 0,056 %мас/хв з досягненням його кінцевого вмісту 0,01% з мінімальним окисленням інших домішок у розплаві.

Попередні дослідження базувалися на вдуванні в металеву ванну кисню та нейтрального газу по чергово, з розділенням періодів окислення та усереднення. При цьому спостерігається локальне переокислення металевої ванни в окислювальний період. Запропоновано та доведено у лабораторних умовах, що використання у якості продувного газу суміші системи «нейтральний газ - кисень», з вмістом останнього 20-30% дозволяє здійснювати пріоритетне окислення вуглецю за режиму донної бульбашкової продувки.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Встановлено, що раціональна форма бульбашкоутворювача донного продувного блоку містить ненаправлену пористість або щілинні отвори з відстанню між щілинами 1,0-1,5 мм, при цьому час гомогенізації металевій ванни скорочується на 42% у порівнянні з використанням каналної пористості.

2. Розроблено авторську методику електрокондуктометричного дослідження стосовно перерозподілу домішок в об'ємі металевій ванни сталерозливного ковша, яка підвищує інформативність щодо ефективності впливу режиму перемішування ванни на розподіл домішок за об'ємом всієї ванни.

3. Запропоновано конструкцію донного продувного блоку для продувки залізовуглецевого розплаву газовою сумішшю системи «кисень-нейтральний газ», яка складається із бульбашкоутворювача, камери для змішування газів та каналів для підведення газів. Запропонована конструкція захищена патентом України № 126453 «Вогнетривкий блок для продувки металу газами».

4. Розроблено рекомендації використання у промислових умовах технології донної продувки рідкого розплаву у сталерозливному ковші при позапічній обробці сумішшю газів системи «кисень-нейтральний газ» (вміст кисню 20-30%, загальна витрата газової суміші 0,25-0,29 м³/т·год), які забезпечують отримання сталі з вмістом вуглецю до 0,01%.

Результати дисертаційного дослідження опубліковано у 15 друкованих працях, в тому числі: у 5 фахових виданнях; у 1 патенті України на корисну модель; у 9 тезах доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-технічних та науково-практичних конференціях, одна з яких проходила за кордоном.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертаційного дослідження:

Статті у наукових фахових виданнях:

1. Молчанов Л.С., **Шеремета Н.А.**, Синегін Є.В. Дослідження ефективності гомогенізації рідкої сталі при продувці через блоки різної конструкції. *Теорія і практика металургії*. 2018. №6. С. 76-80.

<https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.10>

2. Molchanov L., **Arendach N.**, Synehin Y. Study of the design of bottom blowing devices for oxidative blowing in teeming ladles. *Сучасні проблеми металургії*. 2021. № 24. С. 81-89.

<https://doi.org/10.34185/1991-7848.2021.01.08>

3. Молчанов Л.С., Голуб Т.С., **Арендач Н.А.** Комплексне дослідження особливостей перебігу окиснення вуглецю в стальковші при донному бульбашковому продуванні сумішшю газів системи «кисень — нейтральний газ». *Збірник наукових праць ДДТУ Технічні науки*. 2024. Вип..2. С. 19-28

<https://doi.org/10.31319/2519-2884.45.2024.2>

4. Голуб Т.С., **Арендач Н.А.** Термодинамічне дослідження процесів окислення домішок розплаву Fe-C за рахунок взаємодії з бульбашкою системи «нейтральний газ — кисень». *Металл та лиття України*. 2024. Вип. 32. № 3-4. С. 50-61.

<https://doi.org/10.15407/steelcast2024.03-04.007>

5. Молчанов Л.С., **Арендач Н.А.**, Голуб Т.С. Лабораторне дослідження особливості змішування газових струменів технологічних газів. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 222-231

<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38>

Патенти України на корисну модель:

6. Вогнетривкий блок для продувки металу газами. Патент України на корисну модель № 126453 **Шеремета Н.А.**, Молчанов Л.С., Бойченко Б.М., Нізяєв К.Г.,

Стоянов О.М., Синегін Є.В., Лантух О.С., Цибулько В.С. МПК7 С21 С5/48, заявл. 26.12.2017, власник НМетАУ; опубл.25.06.2018, Бюл. № 12. 6с.

<https://iprop-ua.com/inv/pdf/d4hqohtu-pub-description.pdf>

Тези доповідей міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференцій:

7. Донний блок для продувки розплаву сумішшю технологічних газів різного складу / **Н.А. Шеремета**, Б.М. Бойченко, К.Г. Нізяєв, О.М. Стоянов, Л.С. Молчанов, Є.В. Синегін // *Литьє. Металлургия-2018: Материалы VII Международной научно-практической конференции. Запорожье, 22-24 мая 2018 г.* – Запорожье, 2018. – С. 324-325.

https://nmetau.edu.ua/file/litvo__metallurgiya_2018.pdf

8. **Арендач Н.А.**, Молчанов Л.С., Синегін Є.В. Дослідження ефективності масообмінних процесів при продувці розплаву у сталерозливному ковші / Тези доповідей всеукраїнська науково-технічна конференція «Наука і металургія» присвячена 80-річчю Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України. Дніпро, 9-10 жовтня 2019 р. – Дніпро, 2019. – С. 20.

https://isi.gov.ua/wp-content/uploads/2020/01/sc_and_met_2019.pdf

9. Визначення впливу конструктивних параметрів донного продувального блоку на ефективність процесів гомогенізації розплаву / Л.С. Молчанов, Н.А. Арендач, Є.В. Синегін // Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні імені професора Михальова О.І.» Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. Дніпро, 17 – 19 березня 2020 р. – Дніпро, 2020. – Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні імені професора Михальова О.І.: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 17-19 березня, 2020. – С. 48 - 50.

<https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/itmm/article/view/237/146>

10. Математичне моделювання фізикохімічних процесів металургійного виробництва / Л.С. Молчанов, Є.В. Синегін, **Н.А. Арендач** // Всеукраїнська науково-методична конференція «Проблеми математичного моделювання»: Матеріали всеукраїнської науково-методичної конференції. Кам'янське, 27 – 28

травня 2020 р. – Кам'янське, 2020. – Проблеми математичного моделювання: Матеріали всеукраїнської науково-методичної конференції, 27-28 травня, 2020. – С. 14 - 15.

https://www.dstu.dp.ua/uni/downloads/material_konf_traven_%202020.pdf

11. *N. Arendach*, L. Molchanov, Y. Synehin, I. Mamuzić Carbon removal from steel by oxidation blowing in teeming ladle / SHMD – 2020. – P. 433.

<https://hrcak.srce.hr/file/344226>

12. Напрями вдосконалення технології виробництва низько вуглецевих розплавів / *Н.А. Арендач*, Л.С. Молчанов, Є.В. Синегін // Литво. Металургія-2020: Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції. Запоріжжя, 8-10 вересня 2020 р.– Запоріжжя, 2020. – С. 196-197.

https://nmetau.edu.ua/file/lite._metallurgiya.2020.pdf

13. Various bottom blowing devices for oxidative blowing / L. Molchanov, *N. Arendach*, Y. Synehin // Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні»: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. Дніпро, 16 – 18 березня 2021 р. – Дніпро, 2021. – Інформаційні технології в металургії та: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 16-18 березня, 2021. – С. 41 - 44.

<https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/itmm/article/view/648/525>

14. Розробка режимів окислювальної продувки залізовуглецевих розплавів сумішшю інертний газ – кисень у сталерозливному ковші / *Арендач Н.А.*, Молчанов Л.С., Синегін Є.В. // Литво. Металургія-2021: Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції. Запоріжжя, 18-20 травня 2021 р.– Запоріжжя, 2021. – С. 255 - 256.

https://nmetau.edu.ua/file/lite._metallurgiya._2021.pdf

15. Аналіз ефективності видалення вуглецю з розплаву на різних етапах виробництва сталі / Арендач Н.А., Молчанов Л.С. // IV Всеукраїнська науково-технічна конференція «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ 2023», 14-16 листопада 2023 р. – С. 7.

<https://crust.ust.edu.ua/server/api/core/bitstreams/6da1d195-ccc7-4fbf-9e89-d8f42fd1ca29/content>

ЗМІСТ	Стор.
Вступ.....	18
Розділ 1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ЩО ДО ВИРОБНИЦТВА СТАЛЕЙ З НИЗЬКИМ ВМІСТОМ ВУГЛЕЦЮ.....	26
1.1 Загальна класифікація сталей.....	27
1.2 Переваги низьковуглецевих сталей для сучасних виробників.....	28
1.3 Узагальнення способів виробництва низьковуглецевих сталей.....	28
1.4 Виробництво низьковуглецевих сталей у кисневих конвертерах.....	31
1.5 Виробництво низьковуглецевих сталей у АОД чи ГКР конвертерах	37
1.6 Виробництво низьковуглецевих сталей із застосуванням вакууму....	39
1.7 Переваги способу продувки рідкого металевого розплаву у ковші нейтральними газами.....	45
Висновки за розділом 1.....	51
Розділ 2. ТЕРМОДИНАМІЧНА ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ПЕРЕБИГУ РЕАКЦІЙ ПРИ ДОННОМУ ПРОДУВАННІ МЕТАЛУ В КОВШІ.....	53
2.1 Переваги термодинамічного аналізу металургійних процесів за показником вільної енергії Гіббса.....	53
2.2 Аналіз можливості протікання реакції за участю кисню на межі фаз, що взаємодіють між собою у сталюковші	55
2.3 Дослідження впливу гідростатичного тиску у ковші на показник вільної енергії Гіббса реакцій між різними фазами.....	61
Висновки за розділом 2.....	74
Розділ 3. ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ДОННОГО ПРОДУВНОГО БЛОКУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОДУВКИ СУМІШШЮ ГАЗІВ, ЩО МІСТИТЬ КИСЕНЬ.....	76
3.1. Експериментальна установка і методика проведення досліджень щодо встановлення раціональної конструкції донної продувної вставки	78
3.2 Результати моделювання з визначення впливу конструктивних параметрів донного продувного блоку сталерозливного ковша на ефективність масообмінних процесів.....	83

3.3 Вдосконалення конструкції донного продувного блоку для умов продувки сумішшю двох газів.....	94
Висновки за розділом 3.....	98
Розділ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПЕРЕМІШУВАННЯ РІДКОЇ ВАННИ ПРИ ДОННІЙ БУЛЬБАШКО ВІЙ ПРОДУВЦІ ЗА РІЗНИХ ПАРАМЕТРІВ ДУТТЯ.....	100
4.1 Експериментальна установка і методика проведення досліджень щодо встановлення раціональних режимів продувки крізь донний бульбашкоутворювач з ненаправленою пористістю.....	100
4.2 Результати досліджень щодо встановлення раціональних режимів продувки крізь донний бульбашкоутворювач з ненаправленою пористістю.....	106
Висновки за розділом 4.....	125
Розділ 5. ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ОКИСЛЕННЯ ВУГЛЕЦЮ ПРИ ДОННОМУ БУЛЬБАШКОВОМУ ПРОДУВАННІ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВОГО РОЗПЛАВУ СУМІШШЮ КИСЕНЬ – ІНЕРТНИЙ ГАЗ.....	127
5.1 Методика проведення високотемпературного дослідження.....	127
5.2 Дослідження на холодній фізичній моделі задля визначення дуттьових параметрів високотемпературного моделювання.....	129
5.3 Результати високотемпературного дослідження особливостей взаємодії залізовуглецевого розплаву із сумішшю кисень – нейтральний газ	131
5.4 Рекомендації щодо промислового застосування розробленого способу.....	135
Висновки за розділом 5.....	137
Висновки.....	138
Перелік посилань.....	140
Додаток А. СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ АРЕНДАЧ НАТАЛІ АНАТОЛІЇВНИ	154

ВСТУП

Актуальність теми. В сучасних умовах сталь лишається одним з головних конструкційних матеріалів, при цьому особливе місце займає саме сортамент сталей з вмістом вуглецю нижче 0,1 % мас.. Зазначена особливість пов'язана, в першу чергу, з наявністю у них спеціальних механічних властивостей, зокрема підвищеної пластичності при деформації у холодному стані. Таким чином, при використанні у складі машин та агрегатів сталей низько вуглецевого сортаменту з вмістом вуглецю нижче 0,1 % мас. забезпечується висока надійність та експлуатаційна міцність при зниженні загальної металоємкості устаткування.

З позицій технології виробництва зазначеного класу сталей необхідно відзначити, що їх виробництво у кисневих конвертерах з верхньою продувкою супроводжується значним зниженням виходу придатного рідкої сталі, тому в основному їх виробництво проводиться у спеціалізованих агрегатах плавильного спрямування (ГКР та AOD конвертори) та спеціальних агрегатах вакуумної обробки, які передбачають окислювальну продувку під вакуумом. Стосовно вітчизняного стану металургійного виробництва необхідно відзначити, що ГКР конвертори присутні на трьох підприємствах і відрізняються не великою ємністю, а ділянки з вакуумації сталі на металургійних підприємствах представлені лише на ТОВ «МЗ Дніпросталь» та ПрАТ «Дніпроспецсталь». На металургійних комбінатах ПрАТ «Каметсталь», ПрАТ «Запоріжсталь» та ПрАТ «Арсилорміттал Кривий Ріг» виробничих ділянок з вакуумування рідкої сталі не передбачено технологічним циклом.

Таким чином, актуальним завданням для вітчизняної металургійної промисловості є створення технології з виробництва низько вуглецевих сталей з вмістом вуглецю нижче 0,1% у промислових умовах. Це дозволить значно розширити сортамент сталей на існуючих металургійних підприємствах без значних капіталовкладень. При цьому значно зросте конкурентоздатність вітчизняної металопродукції.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами темами. Робота є результатом закінченого циклу науково-дослідних робіт, що проводилися кафедрою металургії чавуну та сталі Українського державного університету науки та технологій (раніше - Національної металургійної академії України) ДР G060F10019 (автор дисертації був виконавцем зазначеної роботи) та відділу фізико-технічних проблем металургії сталі Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України ДР 0124U001695 (автор дисертації приймав участь у виконанні всіх етапів зазначеної роботи відповідно до календарного плану на безоплатній основі).

Мета і завдання дисертаційної роботи. Мета роботи – встановити фізико-хімічні особливості донної окислювальної продувки газовою сумішшю системи «кисень – нейтральний газ» залізовуглецевого розплаву підчас позапічної обробки для забезпечення ефективної технології отримання сталей з вмістом вуглецю 0,1 - 0,01%.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні завдання дослідження:

1. Провести інформаційно-аналітичні дослідження за напрямом сучасних технологічних рішень щодо виробництва сталей із вмістом вуглецю 0,1 - 0,01%.

2. Встановити термодинамічні закономірності та особливості видалення вуглецю за умов донної продувки залізовуглецевого розплаву в сталерозливному ковші за рахунок газоподібної фази, що містить кисень.

3. Вдосконалити конструкцію донного продувального блоку сталерозливного ковша для ефективного видалення вуглецю з рідкого розплаву при позапічній обробці.

4. Встановити основні технологічні параметри за для ефективного видалення вуглецю при позапічній обробці рідкого розплаву із застосуванням донної продувки газовою сумішшю системи «кисень-нейтральний газ».

5. Провести у лабораторних умовах високотемпературне моделювання для визначення раціональних параметрів виробництва сталей із вмістом вуглецю 0,1 - 0,01%.

6. Розробка рекомендацій щодо режиму донної продувки газовою сумішшю системи «кисень-нейтральний газ» під час позапічної обробки рідкого розплаву у сталерозливному ковші, які забезпечать отримання сталей з вмістом вуглецю до 0,01% у промислових умовах.

Об'єкт дослідження – технологія позапічної обробки металу, що передбачає донну продувку розплаву у сталь-ковші сумішшю газів системи «кисень – нейтральний газ» задля окислення вуглецю до необхідних низьких показників вмісту.

Предмет дослідження – гідродинамічні, фізико-хімічні особливості, що характерні для операції зневуглецювання сталі на етапі позапічної обробки за рахунок донної продувки розплаву кисеньвмістною газовою фазою.

Методи досліджень. При виконанні досліджень в роботі використані розрахунково-аналітичні при розробці та вдосконаленні конструкції пристрою для здійснення донної продувки сумішшю газів «кисень – нейтральний газ» у бульбашковому режимі; термодинамічні розрахунки для оцінки ефективності донної окислювальної продувки щодо зниження вмісту вуглецю у розплаві, фізичне моделювання на розроблених моделях ефективності використання різних продувних донних пристроїв за колориметричним способом; перемішування рідкої ванни у ковші при донній продувці у бульбашковому режимі за кондуктометричним способом; способом тіньової зйомки на стенді з дослідження особливостей змішування газових потоків, що взаємодіють під різними кутами; лабораторне високотемпературне дослідження з використанням рідкого металевого розплаву з низьким вмістом вуглецю для оцінки ефективності запропонованого способу видалення вуглецю при продуванні у бульбашковому режимі сумішшю газів системи «кисень – нейтральний газ».

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Отримали подальшого розвитку уявлення що до перебігу окислювальних реакцій в багатокомпонентних залізовуглецевих сплавах за рахунок кисеньвмісної газової фази та тиску на процеси окислення вуглецю на етапі позапічної обробки сталі. Встановлено, що вірогідність протікання реакції розчинення кисню у розплаві та окислення вуглецю до СО збільшується на 19%відн. при збільшенні тиску у 34 рази за рахунок гідростатичного впливу шару металу та шлаку для сталерозливного ковша ємністю 250 т.

Термодинамічні дослідження процесів окислення складових домішок багатокомпонентних залізовуглецевих сплавів проводяться більше ніж 70 років. При цьому, здебільшого всі дослідження проводилися для етапів виготовлення сталі у плавильних агрегатах для умов взаємодії шлако-металевої емульсії з кисневими струменями, що витікають зі звуковою та понадзвуковою швидкістю. Також є певна кількість досліджень, яка висвітлює особливості окислення домішок багатокомпонентного залізовуглецевого розплаву при впливі зниженого тиску. Отримані залежності впливу гідростатичного тиску шару металу для умов сталерозливного ковша ємністю 250-т на вірогідність протікання процесів окислення домішок багатокомпонентного залізовуглецевого розплаву, відповідно до яких можна встановити пріоритетність процесів розчинення газоподібного кисню у розплаві та утворення СО за рахунок взаємодії розчиненого кисню з вуглецем розплаву.

2. За результатами фізичного моделювання при використанні методу тіньової зйомки вперше встановлено, що при взаємодії газових потоків, які витікають з однаковими газодинамічними характеристиками в порожнину камери змішування під кутом 25-40° до вертикальної вісі камери, відбувається повне їх змішування без втрати швидкості потоку суміші газів.

Попередніми дослідженнями встановлено, що умовою змішування двох газових потоків є витікання вздовж однієї вісі назустріч один одному. При цьому відбувається асиміляція газових струменів за рахунок впровадження молекул газу одного потоку у інший з повною втратою швидкостей струменями. В ході проведення дослідження отримані методом тіньової зйомки фотографії взаємодії газових струменів, які дозволили встановити кути нахилу струменів до вертикалі, за яких спостерігається змішування потоків з мінімальними втратами швидкості (встановлено за характером та щільністю результуючого газового струменя, що відображається у формі та кольорі на фотографіях тіньової зйомки).

3. Для промислових умов обробки сталі у ковші ємністю 250-т за результатами низькотемпературного моделювання (рідина, що імітує сталь - вода), встановлено гідродинамічні особливості гомогенізації рідини в сталерозливному ковші при донній продувці сумішшю системи «кисень-нейтральний газ». Вперше встановлено, що за інтенсивності $1\text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ (за умов збільшення витрати продувального газу на 20% у порівнянні зі стандартною технологією) відбувається утворення тангенціальних потоків, які пульсують й залучають більшу частину ванни (~ на 52%) до перемішування та ~ на 42% скорочується тривалість усереднення хімічного складу рідини при додаванні у якість імітатора добавки, що розчиняється, хлориду натрію.

Низькотемпературне дослідження масообмінних процесів в сталерозливному ковші за рахунок продувки технологічними газами досліджується вже майже 70 років. При цьому є значні досягнення з визначення особливостей руху рідкої фази, встановлення швидкостей потоків та закономірностей розчинення феросплавних добавок. Серед дослідників цього напрямку особливе місце займають вітчизняні наукові школи ДДТУ (Самохвалов С.Є., Грес О.В.), ІЧМ (Віхлевщук В.А., Піптюк В.П.) та ФТІМС (Смірнов А.М.). Серед досягнень зазначених дослідницьких шкіл можна виділити: визначення гідродинамічних особливостей під час продувки

у ковші на двофазній моделі; визначення раціональних режимів продувки та ділянок розташування донних продувних блоків; встановлення швидкостей потоків та розподілу температур і концентрацій у об'ємі ванни сталерозливного ковша; дослідження особливостей розчинення добавок у рідкій фазі. Проте необхідно відзначити, що відповідно до сучасних уявлень, представлених у останніх публікаціях як вітчизняних так і закордонних вчених пріоритетна роль в усередненні металевій ванни саме надається вертикальному руху рідини у ковші під час продувки нейтральним газом. Проте, в ході проведення досліджень доведено важливість впливу саме тангенційного руху бульбашкової продувки (у горизонтальній площини ванни) на ефективність процесів масообміну в металевій ванні.

4. За результатами лабораторного високотемпературного моделювання вперше встановлено, що за умов продувки металевого розплаву з вмістом вуглецю 0,3%мас. сумішшю системи «кисень-нейтральний газ» при вмісті кисню 20-30% спостерігається пріоритетне окислення вуглецю зі швидкістю 0,056 %мас/хв з досягненням його кінцевого вмісту 0,01% з мінімальним окисленням інших домішок у розплаві.

Попередні дослідження базувалися на вдуванні в металеву ванну кисню та нейтрального газу по чергово, з розділенням періодів окислення та усереднення. При цьому спостерігається локальне переокислення металевій ванни в окислювальний період. Запропоновано та доведено у лабораторних умовах, що використання у якості продувного газу суміші системи «нейтральний газ - кисень», з вмістом останнього 20-30% дозволяє здійснювати пріоритетне окислення вуглецю за режиму донної бульбашкової продувки.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Встановлено, що раціональна форма бульбашкоутворювача донного продувного блоку містить ненаправлену пористість або щілинні отвори з відстанню між щілинами 1,0-1,5 мм, при цьому час гомогенізації металевій

ванни скорочується на 42% у порівнянні з використання каналної пористості.

2. Розроблено авторську методику електрокондуктометричного дослідження стосовно перерозподілу домішок в об'ємі металеві ванни сталерозливного ковша, яка підвищує інформативність щодо ефективності впливу режиму перемішування ванни на розподіл домішок за об'ємом всієї ванни.

3. Запропоновано конструкцію донного продувного блоку для продувки залізовуглецевого розплаву газовою сумішшю системи «кисень-нейтральний газ», яка складається із бульбашкоутворювача, камери для змішування газів та каналів для підведення газів. Запропонована конструкція захищена патентом України № 126453 «Вогнетривкий блок для продувки металу газами».

4. Розроблено рекомендації використання у промислових умовах технології донної продувки рідкого розплаву у сталерозливному ковші при позапічній обробці сумішшю газів системи «кисень-нейтральний газ» (вміст кисню 20-30%, загальна витрата газової суміші 0,25-0,29 м³/т·год), які забезпечують отримання сталі з вмістом вуглецю до 0,01%.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові та теоретичні положення дисертаційної роботи сформульовані автором особисто і базуються на результатах проведених досліджень. У дисертації не використані ідеї співавторів, які сприяли виконанню роботи.

Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві (в порядку, представленому у списку публікацій здобувача): розробка методики, проведення досліджень, обробка отриманих результатів [1, 2]; проведення розрахунків, аналіз отриманих даних, формулювання обґрунтованих висновків [3, 4]; розробка методик проведення досліджень, здійснення дослідів, узагальнення отриманої інформації [3, 5]; узагальнення інформації стосовно конструкції продувного блоку отриманих на попередньому етапі досліджень [6]; аналіз літературних даних та

узагальнення науково-технічної інформації [10, 12]; узагальнення теоретичних [7, 11, 15] та експериментальних [8, 9, 13, 14] результатів досліджень. Основні положення, висновки і рекомендації представлені у дисертаційній роботі виконані автором особисто.

Структура та обсяг дисертації. Результати дисертаційної роботи викладені на 153 сторінках; складаються зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, який містить 134 найменувань, 1 додатку. Робота містить 93 рисунки та 9 таблиці.

Розділ 1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ЩО ДО ВИРОБНИЦТВА СТАЛЕЙ З НИЗЬКИМ ВМІСТОМ ВУГЛЕЦЮ

Ще 10 – 15 років тому Україна стабільно входила до десятки світових виробників та експортерів сталі, але з 2020 року почався спад виробництва: 12-те місце у 2020 р., 14-те місце у 2021 р., а у 2022 р. через втрату підприємств на сході країни виробництво сталі досягло лише 25-тої позиції у загальному рейтингу виробників [1-4]. У 2023 році країні вдалося піднятися на 23-тє місце і от, на серпень 2024 р., Україна досягла 20-ого місця з результатом 5,27 млн тон, відповідно до повідомлень об'єднання підприємств ДП «Укрметалургпром» [5-6].

Киснево-конвертерний процес є найбільш розповсюдженим щодо виробництва сталей низьколегованого сортаменту у всьому світі через його безперечні переваги у продуктивності та можливостей контролю складу рідкої сталі [7-8]. У сучасному вигляді киснево-конвертерний процес виробництва сталі оформився до кінця 70-х років ХХ століття. В сучасних умовах він є важливою складовою у ланцюзі виробництва металопродукції, яка розміщується між стадією позапічної обробки чавуну та позапічної обробки сталі й наступного безперервного розливання для виробництва металопродукції найвищої якості з переважаючими варіантами верхньої продувки й комбінованого варіанту з верхньою продувкою киснем та донним перемішуванням інертним газом.

Згідно зі статистичним звітом Всесвітньої організації з виробництва сталі, у 2024 році на серпень місяць загальний обсяг світового виробництва становив 144 млн. т. [9] Серед них в середньому 70% сталі виплавляється з використанням кисневих конвертерів, а решта - на сталеливарних заводах з електродуговими печами (ЕДП) (до 30%), і лише дуже небагато частину (менше 5%) становлять мартенівські печі та сталеливарні заводи з індукційними печами [10]. З урахуванням обставин повномасштабного

військового вторгнення в Україні виробництво киснево-конвертерної сталі складає приблизно 60%.

1.1 Загальна класифікація сталей

В XXI столітті вуглецева сталь лишається основним конструкційним матеріалом і більшість складного обладнання виробляється саме з неї. При цьому розроблена значна кількість марок сталей, що різняться між собою хімічним складом та відповідно і службовими властивостями. Загальна класифікація сталей представлена на рис.1.1. [11]

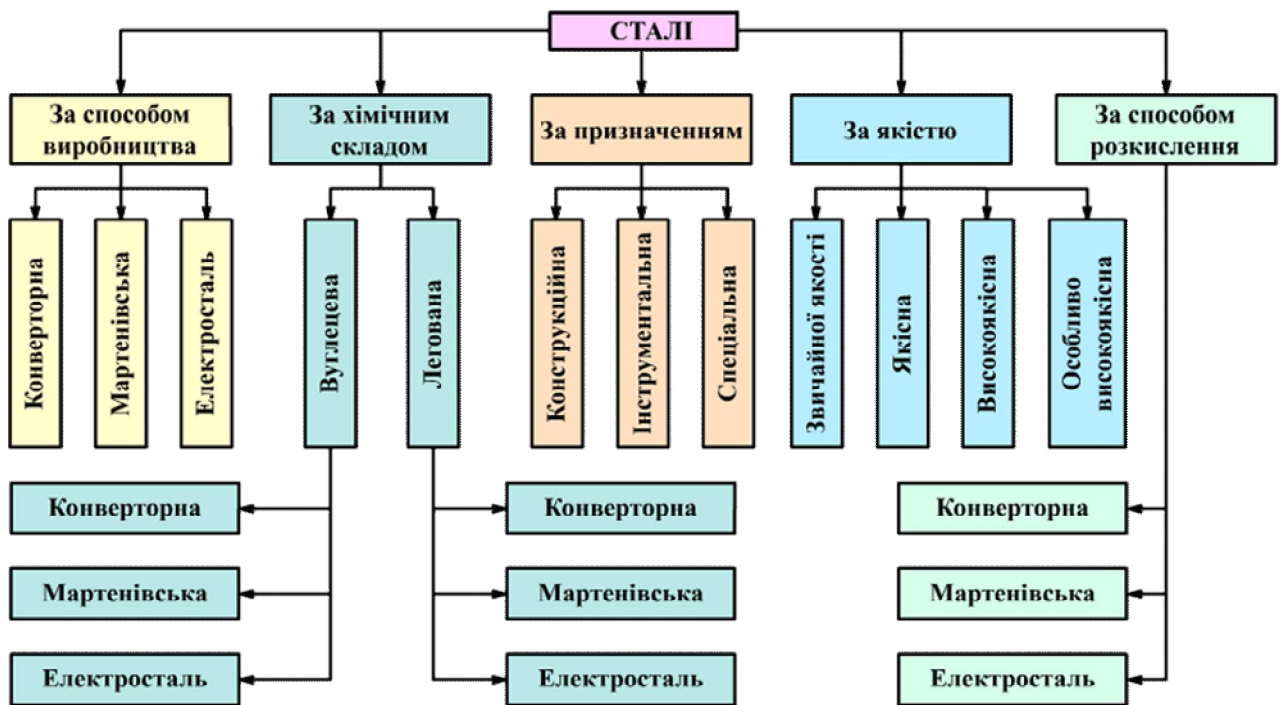


Рисунок 1.1 - Загальна схема класифікації сталей
(https://fizmat.7mile.net/materialoznavstvo/2_3_2-podil-vuglec-stal.html)

Основою загальної класифікації сталей, яку використовують сучасні промислові виробники та споживачі, є вміст вуглецю, який в значній мірі визначає експлуатаційні властивості сталі. Серед різних класів сталей особливе місце займають низько- та ультранизьковуглецеві сталі.

1.2 Переваги низьковуглецевих сталей для сучасних виробників

Низьковуглецева сталь має вміст вуглецю менше 0,3 %мас (частіше менше 0,25%мас.), а ультранизьковуглецева ще нижчу його концентрацію: сумарний вміст вуглецю, сірки, фосфору, кисню, нітрогену та гідрогену не більше 0,005 %мас. [12-13]. Цей клас сталей також називається м'якими сталями через низьку твердість і високу пластичність [14-17]. Проте, вони можуть мати високу межу міцності на розрив та високий коефіцієнт пластичної деформації у холодному стані. Зазначені аспекти розглянутого класу сталей дозволяють отримувати металовироби штампуванням у холодному стані з підвищеними службовими властивостями при понижений металоємкості продукції. Також, низько вуглецеві сталі легко піддаються деформації при згинанні та механічній обробці за допомогою різання. Крім цього, завдяки низькому вмісту вуглецю зазначений клас сталей має відмінні зварювальні властивості і має тенденцію до меншої усадки при зварюванні [18-19]. Низьковуглецеві сталі використовуються у якості матеріалу для виконання основних конструкційних виробів (плити, балки, труби, кутник та інш.) та при армуванні бетону, виготовленні листового прокату, у автомобілебудуванні (насамперед кузови транспортних засобів), при виробництві побутової техніки та побутових товарів (складові меблів та меблі, двері, вікна), а також можуть бути використані при виготовленні елементів, що вимагають стійкості при навантаженнях [14, 16, 20-21].

1.3 Узагальнення способів виробництва низьковуглецевих сталей

Виробництво низьковуглецевих сталей здебільшого здійснюється з використанням плавильних агрегатів конвертерного типу. Одна з проблем традиційного конвертерного процесу виробництва сталей полягає в тому, що перемішування розплаву та змішування фаз в сталеплавильній ванні є недостатнім [22-25]. Як наслідок, при вмісті вуглецю нижче приблизно

0,30 %мас. транспортування вуглецю з об'єму металевої ванни до реакційної зони відбувається повільно, а зневуглецювання є неефективним і супроводжується значним переокисленням. Зміна хімічного складу металу та шлаку при здійсненні продувки у 350-т конвертері представлено на рис. 1.2. У міру зменшення концентрації вуглецю в розплаві все більша кількість кисню вступає у взаємодію з залізом, а не з вуглецем.

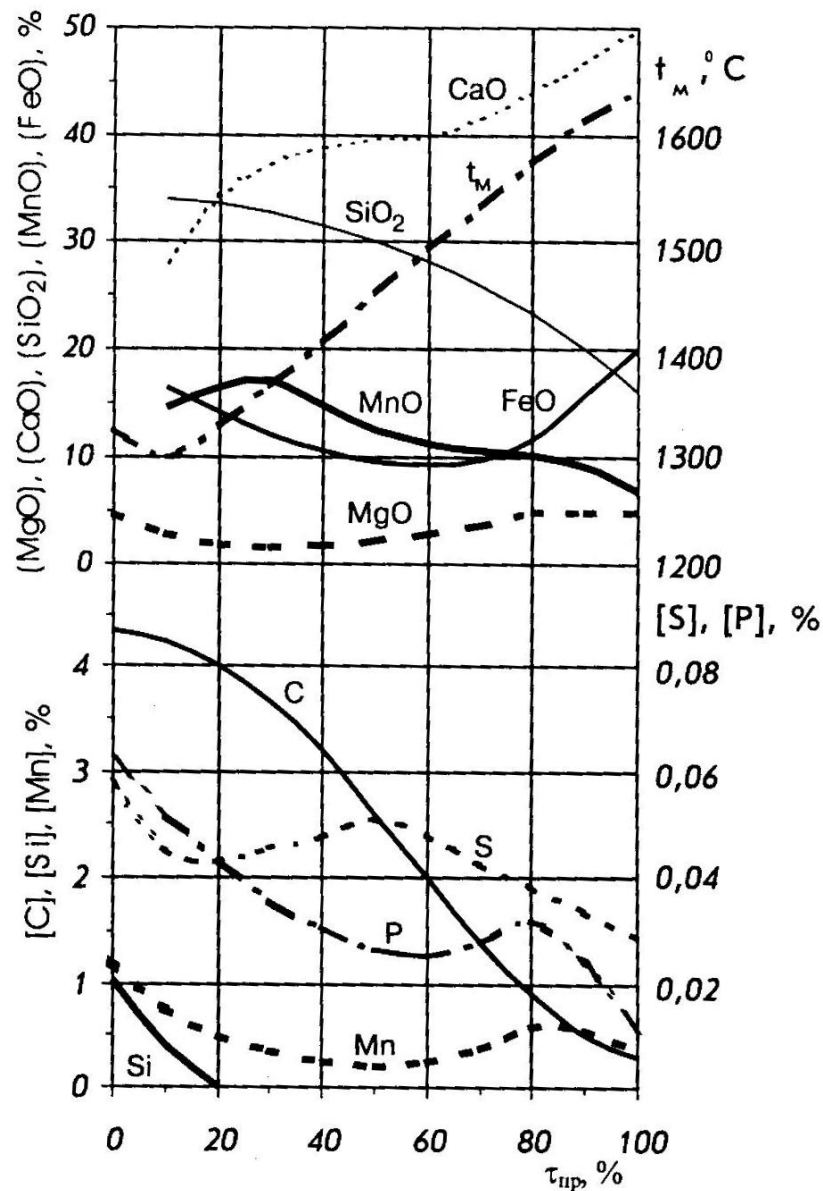


Рисунок 1.2 - Зміна складу металу та шлаку, температури металу під час продувки чавуну на низько вуглецеву сталь (садка конвертера 350 т, витрата брукхту 280 кг/т) [22-25]

Переокислення металевої фази призводить до переходу у шлакову фазу цінних елементів, таких як залізо та марганець. Зазначений механізм окислення супроводжується значним пере окисленням металевої фази. Крім того, окислення інших легуючих компонентів розплаву може погіршити якість сталі та буде додатково викликати необхідність проведення повторного легування з перевитратою розкислюючих та легуючих матеріалів. Надмірне окислення металу також призведе до підвищення температури розплаву та збільшення вмісту оксидів заліза та марганцю в шлаку, що є шкідливим для вогнетривкої футеровки ємності для рафінування. Усі зазначені аспекти знижують ефективність і збільшують вартість конвертерного процесу виробництва сталей з низьким вмістом вуглецю. Тобто для процесу киснево-конвертерної плавки з верхнім підведенням кисню технологічно обґрунтовано виробництво залізовуглецевого напівпродукту з вмістом вуглецю не нижче 0,1 %. Зазначена концентрація вуглецю є критичною, тобто при її досягненні змінюються фізико-хімічні механізми його окислення [26-27]. До концентрації 0,1% окислення вуглецю знаходиться у кінетичній області, тобто швидкість його окислення визначається швидкістю самої хімічної реакції. Нижче концентрації 0,1 % процес окислення вуглецю переходить до дифузійної області, тобто швидкість окислення вуглецю визначається швидкістю масопідводу вуглецю та кисню до місця протікання хімічної реакції.

Виходячи з наведеного вище, виробництво сталей з концентрацією вуглецю нижче 0,1 % пов'язано з необхідністю використання додаткових засобів інтенсифікації масообмінних процесів. Узагальнена схема технічних рішень що до виробництва сталей з вмістом вуглецю нижче 0,1 % представлена на рис. 1.3. Відповідно до даних представлених на ньому виділяють наступні технологічні операції з виробництва сталей: виплавка у кисневих конвертерах, що працюють за схемою подача основного кисню зверху, введення нейтрального газу з низу через пористі продувні блоки; використання технологій газо-кисневого рафінування (існує два процеси ГКР

та AOD); використання технологій окислювальної продувки під вакуумом на етапі позапічної обробки, зокрема на установках циркуляційного або камерного вакуумування.

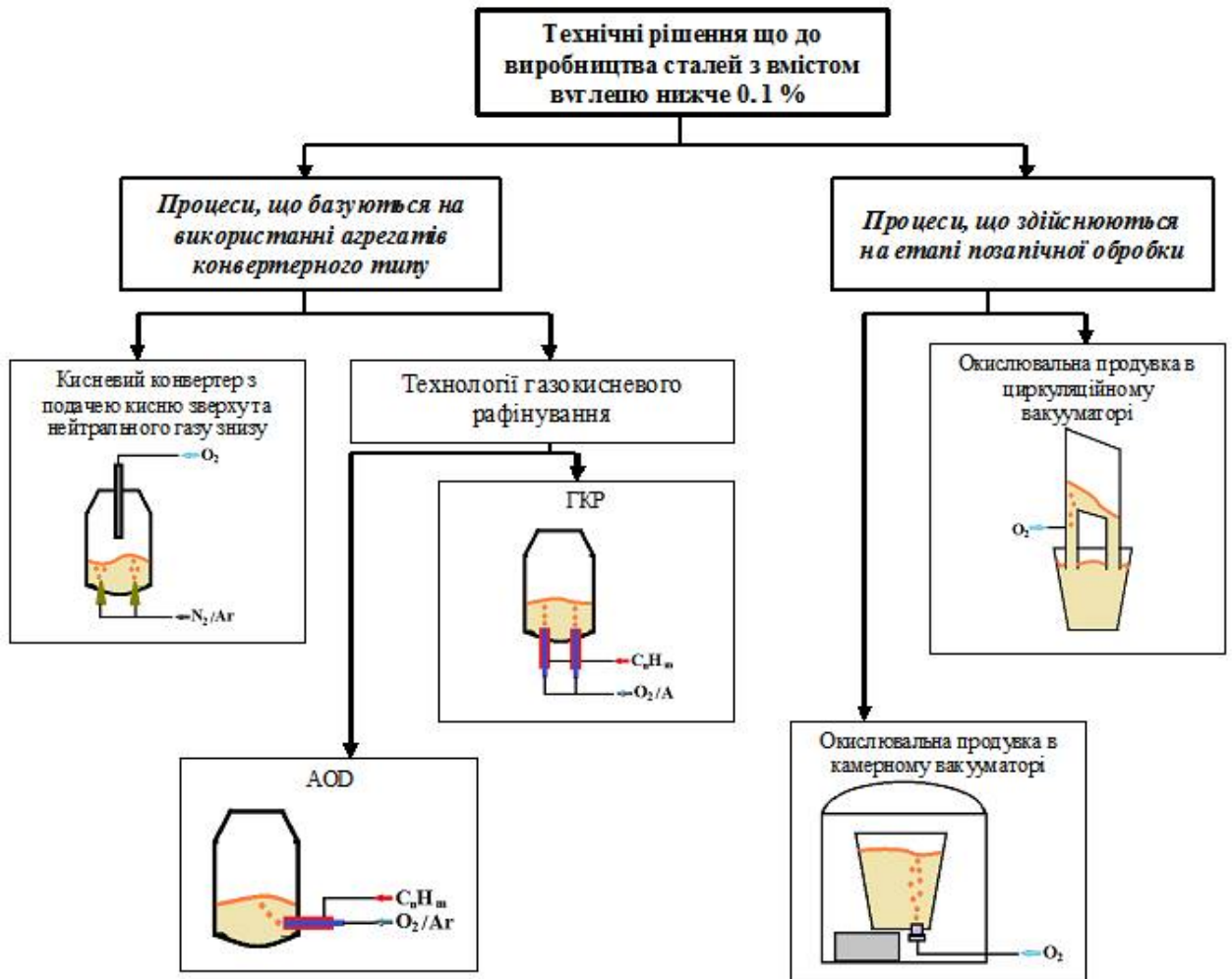


Рисунок 1.3 - Узагальнена схема технічних рішень щодо виробництва сталей з вмістом вуглецю нижче 0,1 %

Розглянемо можливості кожної операції більш детально.

1.4 Виробництво низьковуглецевих сталей у кисневих конвертерах

Так при виробництві напівпродукту в кисневому конвертері з подачею кисню через верхню продувну фурму (рис. 1.4), як було відзначено, можливість зниження вуглецю до низьких концентрації досить обмежена

необхідністю активного перемішування ванни при досягненні критичної концентрації вуглецю.

**варіант з виключно
верхньою продувкою**

LD/BOF/BOP

верхня
киснева фурма

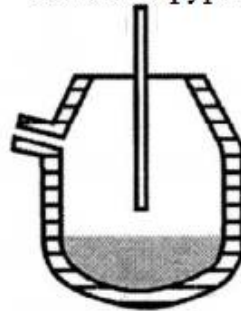
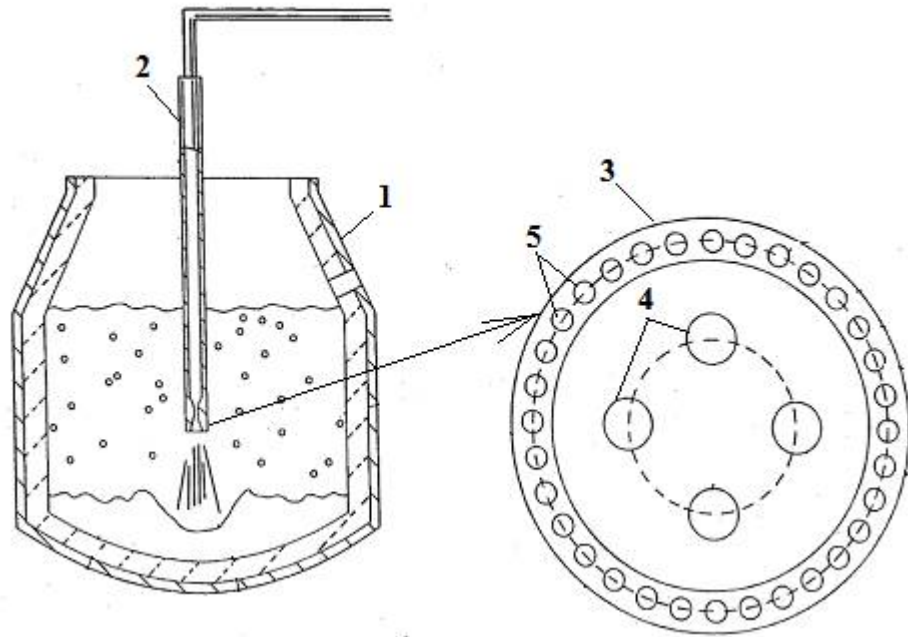


Рисунок 1.4 - Варіанти продувки в кисневому конвертері з використанням виключно верхньої продувної фурми

Для підвищення інтенсивності перемішування авторами [28-29] запропоновано продувка з використанням наконечника верхньої продувної фурми, що містить два ряди різних сопел, крізь які подають різні типи газів (рис. 1.5). Такий наконечник забезпечує продувку в першу фазу конвертерного процесу з «м'яким» режимом подачі кисню, оточеним газовою оболонкою, а на другій фазі - «жорстку» продувку киснем, оточеним полум'яною оболонкою. Під час фази «м'якого» продування кисень виходить із зовнішнього кільця отворів, а інертний газ виходить із внутрішнього кільця отворів, щоб утворити газову оболонку, яка оточує потоки газу з «м'яким» типом продувки і дозволяє потокам газу «м'якого» продування розширюватися. Газова оболонка навколо потоків кисню змушує газові потоки утворювати звичайні струмені. Звичайні надзвукові струменя швидко зменшуються до дозвукових швидкостей, після чого струміння розповсюджується на півкут приблизно 10 градусів, що призводить до зменшення його імпульсу й проникаючої дії струменя та збільшення площі поверхневого контакту з навколишньою атмосферою та ванною.



1 – кисневий конвертер, 2 – верхня продувна фурма, 3 – наконечник, 4 – внутрішній ряд основних сопел, 5 – зовнішній ряд додаткових сопел

Рисунок 1.5 - Схематичне зображення способу інтенсифікації продувки зверху за рахунок використання дворядного наконечника продувної фурми [28-29]

Такі потоки кисню з меншою ймовірністю будуть відбиті нерозплавленим бруктом, який присутній на початку періоду рафінування, що може призвести до пошкодження фурми або футеровки конвертера. Звичайні струмені є турбулентними та захоплюють значну кількість навколишньої атмосфери, яка містить високий відсоток CO. Окис вуглецю допалюється струменями кисню до CO_2 , а тепло, що виділяється, розігріває брукт. Додатковий кисень, що міститься в кільцевій газовій оболонці, що використовується зі звичайними соплами, також реагує з CO і додатково збільшує частку його допалювання. Відповідно до матеріалів, наведених у роботах авторів, змішування у ванні є менш важливим на початку продувки тому, що вміст вуглецю та ефективність зневуглецювання відповідно є високими, а швидкість і кількість втрати заліза на окислення - низькі. Після того як приблизно витрата кисню на плавку досягає приблизно 70 % від

загальної витрати і вміст вуглецю в залізовуглецевому розплаві знижується приблизно до 0,3 %мас. для подальшого зниження вуглецю в конвертері починається друга стадія, коли кисень подається через ті ж додаткові сопла, а крізь основні - подається воденьвмісне паливо для створення полум'яної оболонки, що простягається аж до металевої ванни.

У разі використання лише донної продувки в кисневому конвертері (рис. 1.6) можливо видалення вуглецю за рахунок введення газів з високим окислювальним потенціалом [30].

**варіант з виключно
донною продувкою
ОВМ/Q-ВОР**

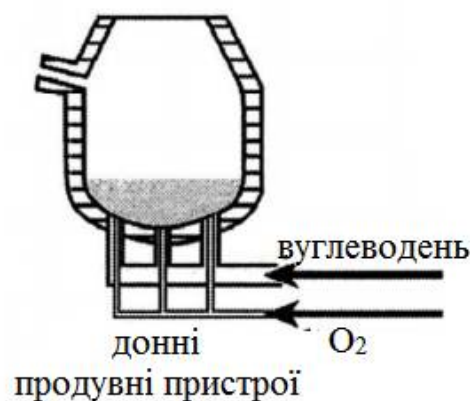


Рисунок 1.6 – Варіанти продувки в конвертері з виключно донною продувкою

Встановлено, що донна продувка Ar або N_2 не впливає на вміст базових елементів розплавленої ванни. Температура рідкої сталі в основному залишається незмінною, а вміст азоту в рідкій сталі збільшується. Проте у випадку, коли знизу подається O_2 або CO_2 відбувається видалення вуглецю. Про цьому в обох випадках швидкість зневуглицювання та вміст азоту й водню в рідкій сталі в основному лишається однаковою, а відрізняється температура розплавленої ванни: у разі використання кисню підвищується на $162\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при використанні CO_2 - на $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ відповідно. [30]

Іншими авторами [31-34] запропоновано виробництво низько вуглецевих марок сталі в кисневому конвертері, який поєднує дві попередньо розглянуті технології: для зниженні вмісту вуглецю, окрім верхньої продувки киснем, в розплав вводять інертний газ для додаткового перемішування крізь донні продувні пристрої. Це так звані комбіновані варіанти продувки в конвертері (рис. 1.7). Зазначається, що ефективне змішування у ванні необхідне для рафінування розплаву [34-35]. Також під час рафінування можливе використання кисню та вуглеводнів [36]. За одним з варіантів спочатку завдяки продувки крізь верхню фурму киснем доводять концентрацію вуглецю у розплаві до вмісту 0,035-0,080 % мас., а потім подають кисень крізь донні фурми фурм з розрахунку $0,2 \text{ м}^3/\text{т}$ розплавленої сталі для досягнення низьких концентрацій вуглецю (до 0,0002 %мас.).

варіанти комбінованої продувки

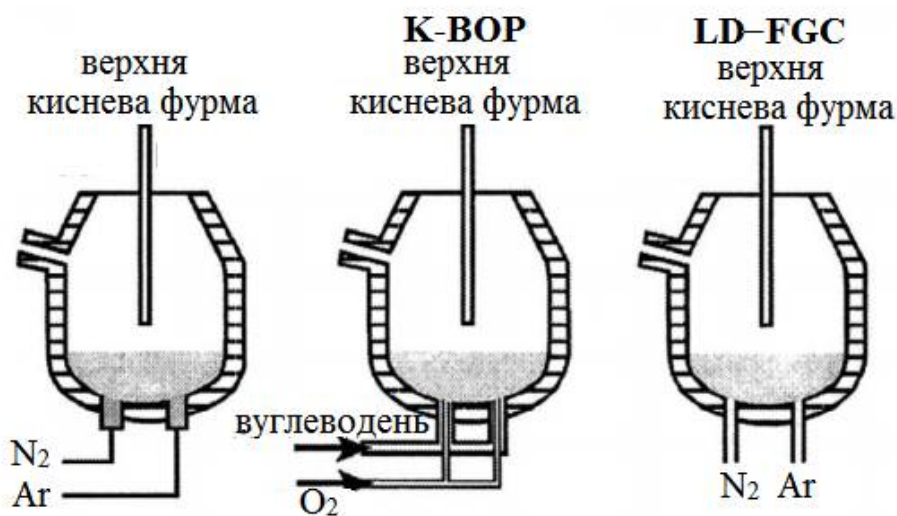


Рисунок 1.7 - Варіанти комбінованої продувки в конвертері [34]

Також інертний газ використовують як заміник кисню для когерентних сопел (рис. 1.8), за допомогою яких пропонується досягати умов видалення вуглецю до низьких показників [37-38].

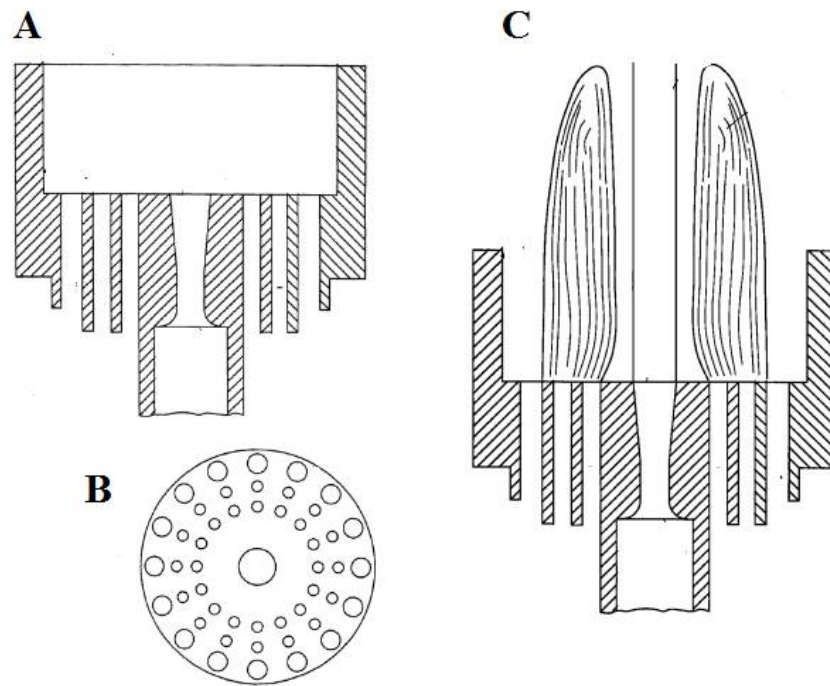


Рисунок 1.8 - Схематичний вигляд складеного сопла: А – повздовжній переріз, В – горизонтальний переріз, С – повздовжній переріз у роботі [37]

Когерентний газовий струмінь зберігає свій діаметр і швидкість після виходу з сопла набагато довше ніж звичайний газовий струмінь за рахунок оточуючого його додаткового газового шару. При цьому основний газовий потік виштовхується з фурми зі збіжним/розбіжним соплом з надзвуковою швидкістю, а перший захисний потік викидається з фурми таким чином, щоб кільцеподібно оточувати основний потік газу. Причому перший захисний потік, що містить окислювач, має швидкість, нижчу за швидкість основного потоку газу. Другий захисний потік, що містить паливо, витікає з фурми кільцевим способом, оточуючи потік кисню. При цьому другий потік також має швидкість, меншу, ніж швидкість основного газового потоку. Паливо горить завдяки першому потоку з окислювачем та/або другому потоку з окислювачем з утворенням полум'яної оболонки навколо основного газового потоку, який витікає коаксіально з основним газовим потоком й підтримує його когерентність на великій відстані після виходу з сопла. Основний газовий потік вводиться в рідину, оточений полум'яною оболонкою. При цьому основний газ є сумішшю інертного газу з менш ніж 5 %мас. кисню або

можливе збільшення в основному газовому потоці частки окисного газу до щонайменше 5%мас. В подальшому за ходом продувки частку кисню можна змінювати. Відмічено, що найкращі результати роботи такого типу сопел спостерігаються при оточенні струменя газу полум'яною оболонкою, утвореною кільцевим потоком палива навколо. Проте, якщо використовувати у якості оболонки інертний газ, ефективність роботи сопел знижується [39].

1.5 Виробництво низьковуглецевих сталей у АОД чи ГКР конвертерах

Іншим варіантом виробництва низько вуглецевих марок сталі є AOD процес (рис. 1.9). Після початкового плавлення металу в електродуговій або індукційній печі його переміщують у AOD агрегат, де він піддається трьом стадіям рафінування: декарбонізація, відновлення та десульфурація [40-43].

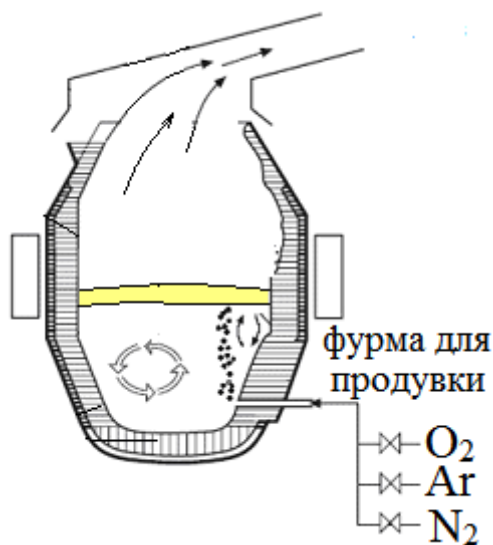


Рисунок 1.9 – Схематичне зображення AOD процесу

Процес AOD дозволяє рафінувати залізовуглецеві розплави для досягнення складу низьковуглецевих сталей та забезпечує численні переваги, такі як високий вихід металу, гнучкість у виборі недорогої сировини, висока точність у досягненні бажаних цільових хімічних речовин, точний контроль вмісту вуглецю до 0,01 % і нижче, швидка десульфурація до менше ніж

0,001% тощо. Зниження вмісту вуглецю є ключовим параметром у процесі AOD, і воно досягається шляхом контролю введення кисню, змішаного з аргоном або азотом, через занурені бокові фурми (див. рис. 1.9), знеуглецьовуючи розплавлений метал з мінімальним небажаним окисленням металу [42-47]. Відповідно до технології розплавлений метал спочатку продувається сумішшю газів з високим співвідношенням кисню до інертного газу. Коли вміст вуглецю у ванні зменшується, співвідношення кисню до інертного газу зменшується. Експлуатаційна практика полягає у створенні двох або трьох ступенів продування з різними співвідношеннями кисень-інертний газ, що є точкою зміни запланованої концентрації вуглецю в кінці кожного проміжного етапу (а саме 0,40 % або 0,25 %) , до кінцевої концентрації понад 0,1 %. Весь кисень, що вводиться за допомогою фурми, реагує з ванною. Реакція окислення є екзотермічною та викликає значне підвищення температури від початкових 1400 - 1500 °C до понад 1700 °C наприкінці фази продування киснем. Враховуючи, що зазначена висока температура може пошкодити вогнетривку внутрішню футерівку AOD конвертера, тому відповідно до технологічних настанов до складу шихти обов'язково додається охолоджуючий брукт. Крім того, також додаються необхідні неметалеві складові шихти, щоб отримати цільовий точний хімічний склад за вмістом сірки та фосфору.

Іншим варіантом, подібним до AOD процесу, є спосіб виробництва рідкої сталі за технологією ГКР. Цей метод реалізується в конвертерному агрегаті з донним підведенням дуття і відрізняється високою швидкістю протікання всіх процесів рафінування, порівняно з відомими аналогами (процесами AOD та VOD) [48-51]. Метод ГКР передбачає введення через донні продувні пристрої кисню та інертних газів для окислювального та перемішуючого ефектів й відрізняється більш високою продуктивністю процесу, розширює технологічні можливості сталеплавильного переділу та водночас забезпечує якість готового металу на рівні кращих світових стандартів.

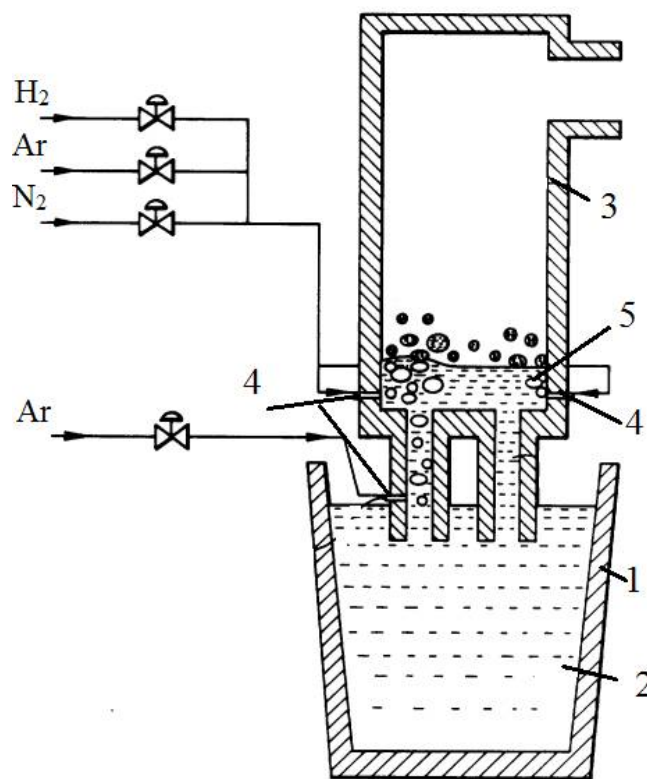
До переваг методу ГКР можна віднести [48-51]:

- збільшення продуктивності в 1,5 - 2,0 рази, порівняно з AOD процесом, що дозволяє знизити питомі витрати на капітальне будівництво;
- технологічна гнучкість процесу забезпечує використання для виплавки сталі як рідкий напівпродукт, із додаванням найдешевшого брухту та високовуглецевих феросплавів (без обмежень за початковим вмістом вуглецю), так і зі 100 % відходів нержавіючих сталей;
- витрати аргону при газокисневому рафінуванні, в порівнянні з процесом AOD, зменшуються в 1,5 - 2,0 рази;
- універсальність методу, що дозволяє виплавляти не тільки будь-які корозійностійкі сталі та сплави (включаючи особливо низьковуглецеві), а й практично всі високоякісні сталі різного сортаменту, у тому числі вуглецеві, низьколеговані та леговані;
- у конвертері реалізуються раціональні температурний та шлаковий режими плавки залежно від сортаменту сталі та одиничної ємності агрегату, включаючи малі конвертери ємністю 5 т;
- можливість організації роздільного випуску металу і шлаку і, відповідно, успішної реалізації глибокої десульфурзації сталі та її легування титаном або іншими елементами, що легко окислюються.

1.6 Виробництво низьковуглецевих сталей із застосуванням вакууму

У країнах з сучасним рівнем організації металургійного виробництва (КНР, Японія) ультранизьковуглецеву сталь отримують шляхом зневуглецювання металевого розплаву до тих пір, поки вміст вуглецю не буде знижено до 0,02 - 0,05 %мас. за допомогою конвертера, а потім подальшого більш глибокого зневуглецювання сталі під зниженим тиском за допомогою вакуумного дегазатора, такого як RH дегазатор [52-58] (рис. 1.10). За цим методом не вдається виробити наднизьковуглецеву сталь

із вмістом вуглецю менше 0,01 ppm у промислових масштабах. Для підвищення швидкості зневуглецювання важливо збільшити площу, де відбувається реакція між газовою складовою та вуглецем. При цьому місцем реакції вважаються бульбашки газу в розплавленій сталі або поверхня розплавленої сталі у вакуумній камері, або бризки металу у вакуумній камері. Традиційно прийнято вважати, що згадані вище три реакційні зони можуть бути збільшені за рахунок подачі додатково нейтральних газів (насамперед аргону) для перемішування розплавів та за рахунок збільшення швидкості подачі газу аргону для перемішування або рециркуляції.



1 – сталь-ківш, 2 – рідкий металевий розплав, 3 – вакуумна камера, 4 – продувні пристрої для подачі перемішуючого газу, 5 – бульбашки газу

Рисунок 1.10 - Схематичне зображення вакуумного дегазатора з додатковим пермішуванням розплаву газами [58]

Однак, продувка аргоном із великою швидкістю приблизно 20 нм³/хв. створює проблему, оскільки дегазатор не може працювати безперервно через осадження бризок металу на внутрішню поверхню вакуумної камери

вакуумного дегазатора в результаті енергійного утворення бризок металу, викликаного вдуванням газу аргону. Щоб уникнути цієї проблеми, авторами був запропонований метод [57-58], у якому газоподібний водень або газ, що містить водень, вдували у розплавлену сталь, щоб збільшити вміст водню, розчиненого в розплаві. Відповідно до цього методу відбувалося утворення бульбашок газоподібного водню для посилення ефекту перемішування та збільшення швидкості знеуглецювання шляхом збільшення площі реакційних центрів. Було підтверджено, що цей метод може підвищити швидкість знеуглецювання в низьковуглецевій області і, отже, сприяє підвищенню ефективності виробництва ультра низьковуглецевої сталі. Цей метод, проте, вимагає, щоб вміст водню підтримувався на досить високому рівні, наприклад, від 3 до 5 ppm, щоб забезпечити помітний ефект у сприянні знеуглецювання. Щоб підтримувати такий високий вміст водню, необхідно, щоб водень продувався зі швидкістю не менше ніж 5 нм³/хв, коли використовується дегазатор РН потужністю, наприклад, 250 тонн. Це спричиняє різноманітні проблеми, такі як збільшення швидкості утворення бризок металу у вакуумній камері та скорочення терміну служби газодувної фурми. Крім того, швидкість утилізації водню зменшується, оскільки швидкість газоподібного водню збільшується через фурми, вбудовані у бокові стінки рециркуляційної труби. Отже, було дуже важко підтримувати вміст водню на такому високому рівні, вводячи газоподібний водень через фурми, розташовані збоку. Крім цього значно підвищувався залишковий вміст гідрогену у сталі.

Загалом на сьогодні існують різні варіанти проведення обробки рідкої сталі в ковші, які спрямовані, по-перше, на зниження вмісту розчинених у металевому розплаві небажаних газів та сірки й підігрів розплаву, а вже потім на видалення вуглецю (рис. 1.11) [59-63]. Усі позапічні методи, які використовують вакуумну обробку сталі, можна розділити на окремі групи:

- струминні (оброблення струменя металу при переливанні з ковша в ківш або виливницю);

- ковшові звичайного типу з примусовим перемішуванням металу та додатковим підігрівом (ASEA-SKF та BAD) і фурмою для продування розплаву киснем (BKP);
- порційні (DH) та циркуляційні (RH) [60, 64, 65].

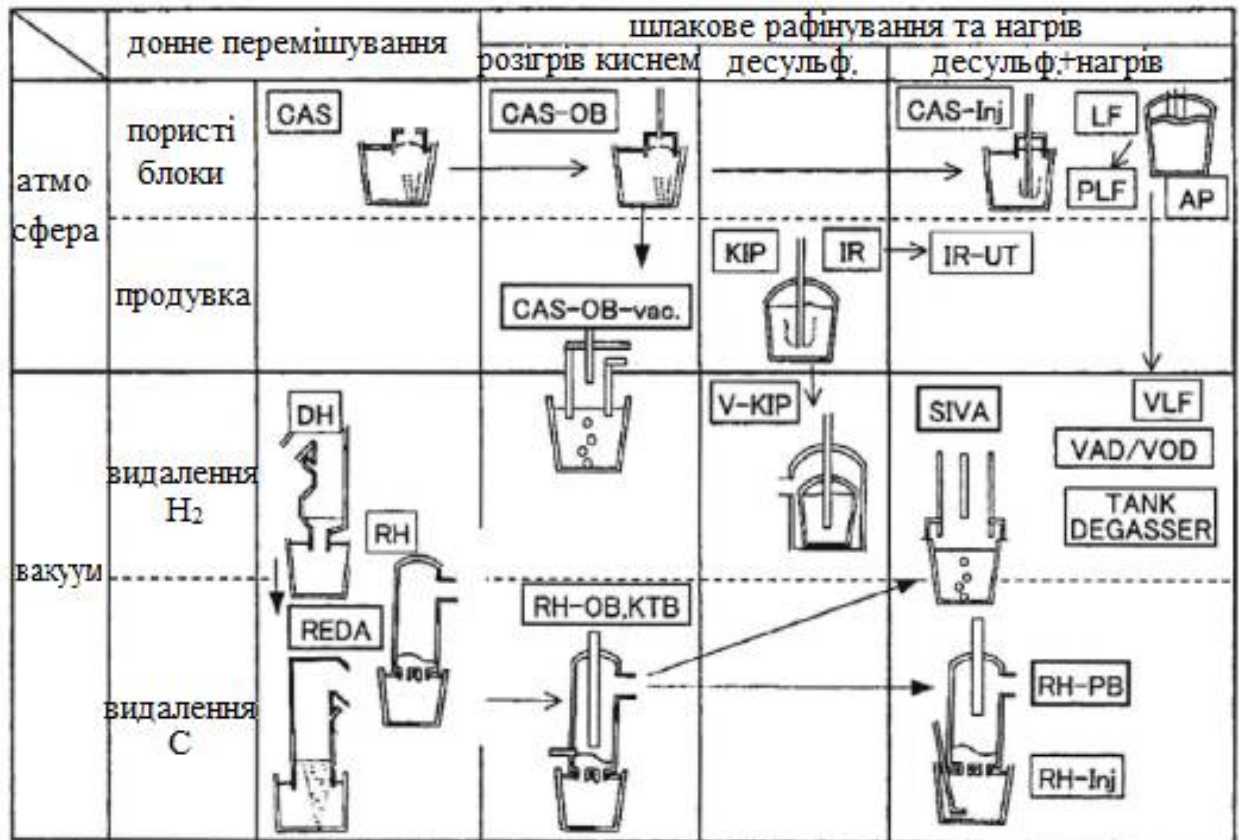


Рисунок 1.11 - Варіанти проведення обробки рідкої сталі у тому числі з використанням вакууму для зниження вмісту вуглецю [59]

Вакуумування в ковші є одним із розповсюджених методів, який дозволяє знизити газонасиченість металу та підвищити його чистоту за неметалічними включеннями за рахунок розкиснення вуглецем. Однак, ураховуючи специфічну конструкцію ковшів (співвідношення висоти до діаметру, яке, як правило, більше одиниці), для досягнення вмісту газів у розплаві, близьких до рівноважних, та низького вмісту вуглецю, тривалість вакуумування розтягується у часі. Надалі оброблена вакуумом сталь розливається на

повітрі, що викликає повторне окиснення та забруднення її продуктами окиснення.

Під час відливання злитків у вакуумі у виливницю її встановлюють у вакуумну камеру і струмінь сталі розпилюється газами, які виділяються з рідкого металу, на безліч крапель [66-69]. Це приводить до різкого зростання поверхні рідкого металу і ефективності оброблення. Те ж саме відбувається при вакуумуванні струменя під час переливу металу із ковша в ківш.

Суть порційного і циркуляційного вакуумування полягає в тому, що, маючи порівняно невеликий об'єм вакуумної камери, через неї за невеликий проміжок часу прокачують увесь метал, який знаходиться в ковші, і, таким чином, відбувається вакуумне оброблення всієї маси розплавленого металу, яке супроводжується інтенсивним перемішуванням розплаву [70-72].

Вакуумно-шлакове оброблення сталі полягає в тому, що ківш або виливницю, що заповнені рідким металом, установлюють у герметичну камеру, в якій створюють розрідження, в результаті якого відбувається спінювання шлаку [73 - 76]. Зверху через отвір у кришці подають струмінь рідкого металу, який в умовах вакууму розривається на безліч крапель. Краплі, що утворилися, потрапляють на спінений шлак. За рахунок дроблення струменя на краплі контактна поверхня в системі метал-шлак різко зростає, що забезпечує інтенсивне оброблення металу шлаком під час руху крапель через шар спіненого шлаку.

В описаних методах вакуумування умови дегазації металу не однакові, тому і кінцевий вміст газів, вуглецю та неметалічних включень в обробленій сталі може суттєво відрізнятися.

Серед різних способів обробки металу у ковші за допомогою вакууму виділяються ті, що використовують для видалення вуглецю додаткове введення у камеру дегазатора потоку кисню через додаткове обладнання. Такий напрямок обробки отримав назву RH-OB. У другій половині 1980-х років компанія Kawasaki Steel розробила спосіб подачі кисню на поверхню розплаву в камеру вакууматора через верхню продувну фурму (RH-KTB -

Kawasaki Top Blowing) (рис. 1.12). Цей спосіб дозволяв ще й підігрівати розплав за рахунок перебігу окислювальних реакцій. Проте дещо знижувався вихід придатного. Переваги RH-KTB перед RH:

- кінцевий вміст вуглецю в конвертерному розплаві не потрібно робити дуже низьким, і, отже, продуктивність і вихід конвертерного розплаву зростають;
- спалювання газу CO, що виділяється в ємності, завдяки реакції з O_2 , що вдувається зверху, запобігає втраті температури розплаву, дозволяє знизити температуру конвертерного розплаву;
- усуваються проблемні утворення та видалення накопичень бризок на внутрішній стінці камери, і, отже, втрата розплаву, спричинена розбризкуванням мінімізується.

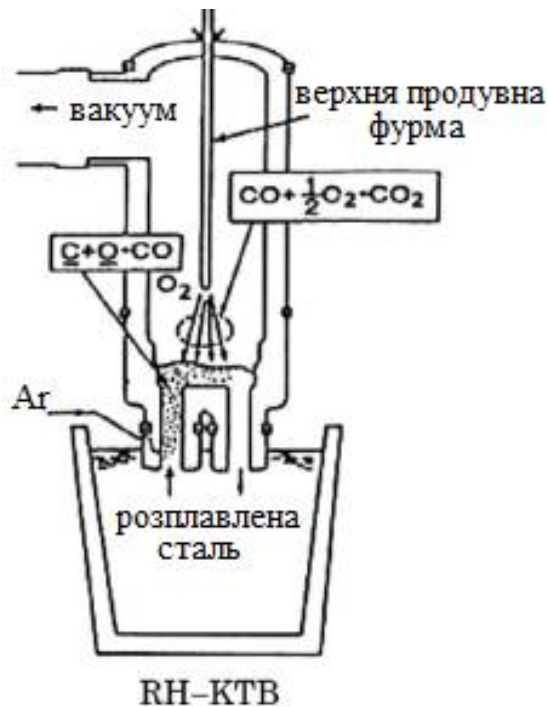


Рисунок 1.12 - Спосіб обробки рідкої сталі RH-KTB [77]

RH-KTB отримав широке застосування не тільки в Японії, але й Європі. Однак, основним складним моментом у реалізації цього напрямку є необхідність складного додаткового обладнання – вакуум камери та втрати металу з цим пристроєм. Крім того, слід зауважити, що обробка сталі у RH агрегаті значно впливає на якість сталі з ультранизьким вмістом домішок через можливість утворення оксидних включень при подачі кисню в агрегат,

через домішки у феросплавах, що використовуються під час процесу, та часток шлаку від розкислення. Крім того були знайдені включення оксидів титану.

1.7 Переваги способу продувки рідкого металевого розплаву у ковші нейтральними газами

Технологічно операція продувки великих мас металу інертними газами у ковші легше і дешевше, ніж обробка вакуумом, тому там, де це можливо, обробку вакуумом замінюють на довшу за часом, проте дешевшу обробку інертними газами, або її проводять одночасно з вакуумуванням для скорочення загального часу операції [61, 78-81]. Оброблення сталі продуванням інертними газами за фізичним впливом схоже на вакуумування, оскільки під час продування безліч бульбашок інертного газу пронизують об'єм рідкого металу. Кожна з бульбашок являє собою мініатюрну камеру з хімічним вакуумом, до якої прагнуть потрапити (дифундують) розчинені гази, оксидні та сульфідні включення [82–85]. Операція продування великого об'єму металу інертним газом у ковші супроводжується достатньо інтенсивним перемішуванням розплаву, яке сприяє його гомогенізації за хімічним складом та температурою. Продування розплаву інертним газом (наприклад аргоном) як метод підвищення якості сталі був розвинутий завдяки удосконаленню та здешевленню виробництва у великих обсягах аргону, який є супутнім продуктом при отриманні кисню. Аргон у металургії відіграє як самостійну, так і допоміжну роль [82]. Під час продування розплаву газом відбувається інтенсивне перемішування металу газовими бульбашками, внаслідок чого різко зростає контактна поверхня в системі метал-газ. Це сприяє видаленню з металу неметалічних включень та сірки, а також газів, що розчинені в металі. Дія аргону, як дегазатора, ґрунтується на тому, що, створюючи хімічний вакуум для газів, які розчинені в металі

(водню та азоту), бульбашки аргону поглинають гази із розплаву і виносять їх у навколишню атмосферу.

Основні закономірності гідродинаміки під час продування металевого розплаву газами були викладені в роботах, присвячених руху рідини та газу в умовах конверторного виробництва [86–95]. Дослідження проводились на холодних моделях та в промислових умовах. Результати моделювання показали, що процес продування може відбуватися в наступних режимах: бульбашковому, бульбашково-струминному та струминному в залежності від кількості (швидкості) газу, що подається. Рух рідини в разі дії газового струменя має колоподібний замкнений характер: знизу вверх у напрямку потоку бульбашок газу, по поверхні ванни радіально до стінки ковша і вздовж стінки ковша вниз до днища (рис. 1.13). Інтенсивність перемішування (ступінь турбулентності) залежить від швидкості підняття бульбашок газу, їх діаметра, температурного розширення газу та щільності рідини, яка продувається. При витіканні газу в бульбашковому режимі швидкість підняття бульбашок не перевищує 0,15 м/с.

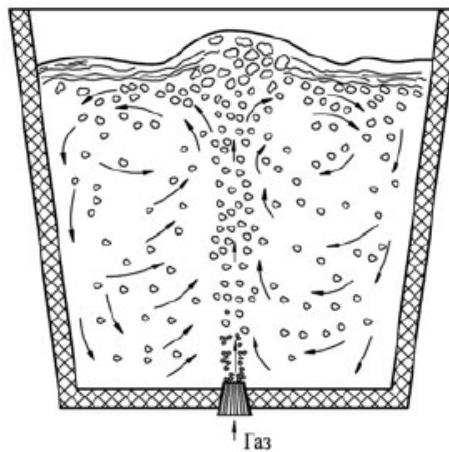


Рисунок 1.13 – Схема руху розплаву та газових бульбашок при продуванні ковша через пористу пробку [61]

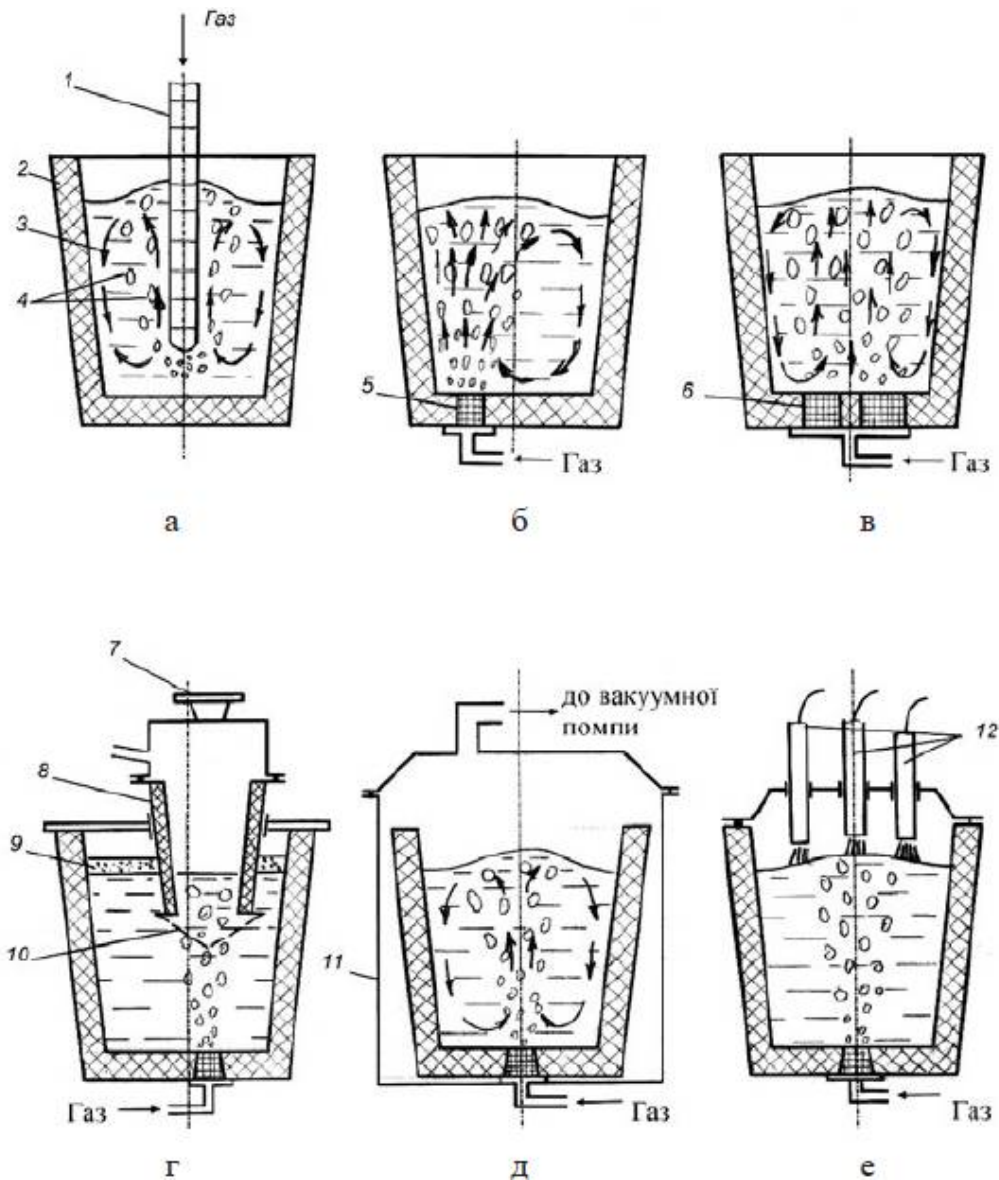
У разі витікання газу в бульбашково-струминному режимі швидкість підняття бульбашок перевищує 0,50 м/с, що характеризує різко виражений турбулентний рух металу при продуванні.

У процесі моделювання було встановлено, що не всі бульбашки аргону можуть перебороти сили поверхневого натягу на межі шлак-метал. Значна частина їх знову втягується в глибину розплаву під дією потоків металу [90-93]. Разом з газовими бульбашками відбувається емульгування шлакової фази. Цей процес підвищує ефективність оброблення продуванням в результаті збільшення тривалості перебування газових бульбашок у розплаві, тобто за рахунок більш повного насичення їх газами, що розчинені в металі, та флотації включень.

Рух рідкого металу в ковші залежить від методу та місця введення газового струменя в розплав. На сьогодні існує велика кількість технічних засобів для продування рідкої сталі газами різного складу (рис. 1.14), які можна розділити на чотири групи:

- уведення газів через фурми з вогнетривких матеріалів, порожнисті стопори (фальш-стопори) або двошарові футеровані трубки (рис. 1.14, а);
- уведення газів через пористі елементи невеликих розмірів для зосередженого (концентрованого) продування, які встановлюють у днищі або стінці ковша (рис. 1.14, б);
- уведення газів через пористі елементи великих розмірів для розосередженого продування по перетину ковша, які встановлюють, як правило, в днищі ковша (рис. 1.14, в);
- продування газами разом з іншими методами позапічного оброблення (1.14, г, д, е).

Продування рідкої сталі в ковші відповідно може здійснюватися за допомогою занурених фурм із вогнетривких матеріалів, фальш-стопорів або двошарових трубок футерованих зовні вогнетривким матеріалом. Продування аргоном через фальш-стопор (рис. 1.15) – один із найбільш простих у технічному плані методів оброблення рідкої сталі в ковші, який дозволяє без особливих витрат організувати цей процес та отримати метал більш однорідний за хімічним складом і чистий за неметалічними включеннями та газами [61, 97].

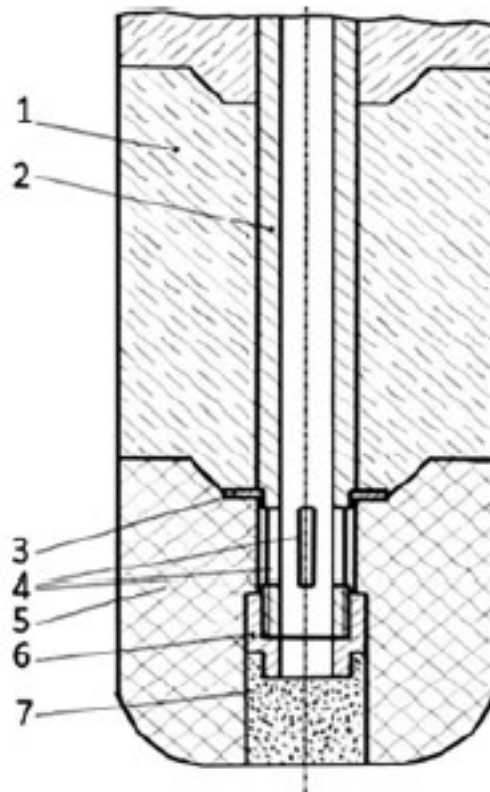


1 – фурма або фальш-стопор; 2 – ківш; 3 – рідкий метал; 4 – бульбашки газу; 5 – пориста пробка з вогнетривкого матеріалу; 6 – пористі блоки з вогнетривкого матеріалу; 7 – люк для уведення розкиснювачів; 8 – труба з вогнетривкого матеріалу; 9 – шлак; 10 – витратний сталевий конус; 11 – вакуумна камера; 12 – електроди

Рисунок 1.14 – Схеми продування сталі в ковші рафінувальним газом: а – через фальш-стопор; б – через пористу пробку в днищі ковша; в – через пористі блоки в днищі ковша; г – схема CAS-процесу; д – продування з вакуумуванням ковша; е – продування з електрообігріванням

До недоліків даного процесу можна віднести неспроможність подачі великої кількості газу через пористу пробку фальш-стопора, обмежений

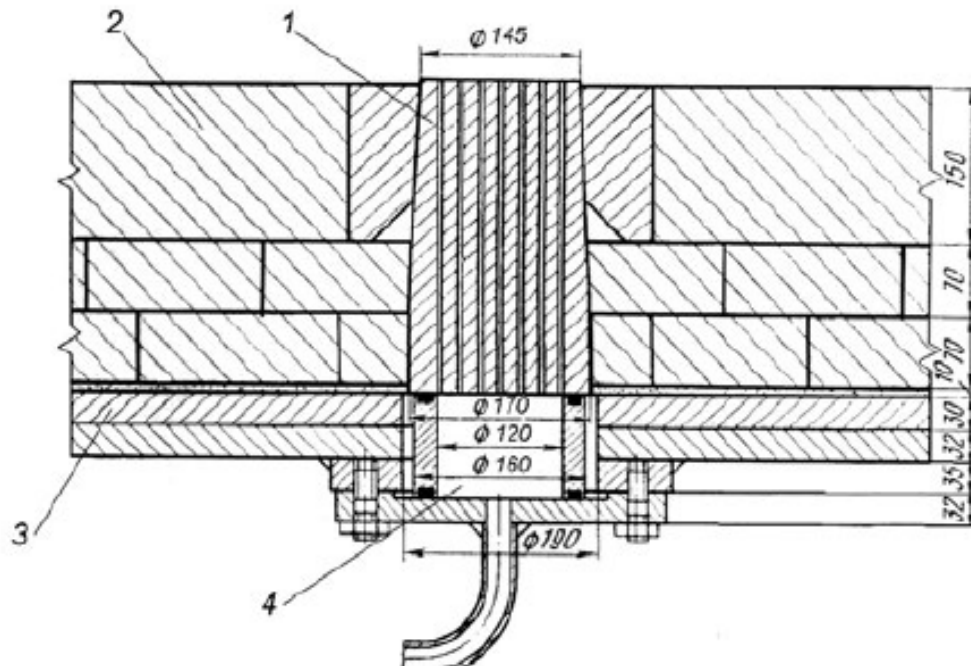
об'єм металу, що обробляється, та обмежений час продування внаслідок можливого руйнування стопора. Під час продування через фальш-стопор відбувається інтенсивне вирування металу навколо стопора, яке призводить до розмивання вогнетриву та забруднення сталі продуктами ерозії.



1 – вогнетривка котушка; 2 – металева труба; 3 – опорне кільце; 4 – прорізи в трубі для виходу аргону; 5 – пориста пробка з плавленого муліту; 6 – контргайка; 7 – порожнина в пористій пробці, яка заповнюється вогнетривким матеріалом

Рисунок 1.15 – Схема кріплення пористої пробки з плавленого муліту до стрижня фальш-стопора [61]

Для усунення вище перерахованих недоліків, характерних для пристроїв першої групи, продування рідкої сталі в ковші здійснюють через спеціальні фурми (багатоканальні або щілинні), які встановлюють у днищі ковша (рис. 1.16) [61, 98-100].



1 – багатоканальна фурма; 2 – днище; 3 – кожух ковша; 4 – газовий колектор

Рисунок 1.16 – Конструкція та схема установки багатоканальної фурми в днищі ковша [61]

Промислові масштаби продування металу в ковші газами значно виросли після отримання пористих вогнетривів з високою газопроникністю у вигляді невеликих за розміром вставок або достатньо крупних блоків. Продування розплаву через пористі блоки у днищі ковша забезпечує більш рівномірний розподіл газового потоку в розплаві та незначне зношування самого блоку. Недоліком цього методу є те, що для заміни пористих елементів необхідно охолоджувати кладку ковша до прийнятної температури.

Вказані методи донної продувки металу в ковші інертним газом – аргоном можуть бути використані для також для продувки розплаву сумішшю газів, одним з яких буде окислювальний газ - кисень, задля забезпечення окислення необхідних компонентів розплаву, наприклад, вуглецю. Такий спосіб може поєднати переваги обробки металевого розплаву інертним газом (усереднення добавок, зниження вмісту розчинених газів та неметалевих включень) із зневуглицюванням розплаву при невеликому вмісті

вуглецю у розплаві до обробки. Тому актуальним є подальше дослідження та розробка варіанта донної продувки в ковші, який зможе забезпечити вирішення задачі зневуглецювання до необхідних низьких концентрацій.

Висновки за розділом 1

За результатами комплексного дослідження проведеного за актуальними джерелами науково-технічної інформації встановлено, що використання технологій з виплавки сталей з вмістом вуглецю нижче 0,1 % у кисневих конвертерах з подачею нейтрального газу з низу, а основного кисню зверху використовується на сучасних металургійних підприємствах, проте супроводжується зниженням виходу придатного рідкої сталі у порівнянні з виробництвом сталей вуглецевого сортаменту. Це зумовлено фізико-хімічними особливостями процесу окислення вуглецю, зокрема його переходом з кінетичної ділянки у дифузійну і як наслідок необхідністю додаткової інтенсифікації масообмінних процесів в металевій ванні. Що стосується технологій газо-кисневого рафінування, то вона базується на подаванні технологічних газів у нижню частини сталеплавильного агрегату, зокрема через дно для ГКР процесу та з бокової сторони ванни – для AOD. При цьому використовуються фурми спеціальної конструкції «труба у трубі», які забезпечують введення кисню у металеву ванну в оболонці з палива, виключаючи високотемпературний вплив зони окислення на футерівку. При цьому технологія газокисневого рафінування передбачає чергування продувки металеві ванни киснем та нейтральним газом, що забезпечує уникнення переокислення металу та відповідно досягнення високого рівня виходу придатного рідкої сталі. Використання методів окислювальної продувки на етапі вакуумування сталі є найбільш ефективним методом зниження вмісту вуглецю нижче концентрації 0,1%. Це зумовлено саме значним впливом зовнішнього тиску на процеси окислення (моноксид вуглецю є газоподібною речовиною). Суттєвим недоліком процесів

видалення вуглецю з металевого розплаву нижче 0,1 %, що базуються на процесах газо-кисневого рафінування є використання спеціального технологічного обладнання встановлення якого потребує значних капіталовкладень. Що стосується процесів окислення вуглецю киснем при пониженому тиску, то вони масово не застосовуються через невелику стійкість вузлів підводу кисню у розплав.

Відмічено, що за для проведення позапічної обробки металевого розплаву у ковші раціонально проводити продувку інертним газом – аргоном, який забезпечить усереднення розплаву із одночасним видаленням газів та неметалевих включень. Таку продувку краще проводити крізь донні продувні пристрої у бульбашковому режимі, що забезпечить якісне перемішування ванни. Крім того, вказаний спосіб обробки розплаву можна вдосконалити шляхом заміни інертного газу на суміш інертний газ – кисень задля забезпечення додаткового зневуглецювання металевого розплаву до необхідних низьких концентрації без застосування вартісного обладнання, як, наприклад, за умов вакуумування.

Таким чином, виходячи з наведеного вище найбільш актуальним завданням в контексті вдосконалення технологічних процесів з виробництва сталей з вмістом вуглецю нижче 0,1 % є винесення операції з видалення вуглецю нижче вказаної концентрації в окрему технологічну операцію, що виконується на етапі позапічної обробки сталі.

РОЗДІЛ 2. ТЕРМОДИНАМІЧНА ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ПЕРЕБІГУ РЕАКЦІЙ ПРИ ДОННОМУ ПРОДУВАННІ МЕТАЛУ В КОВШІ

2.1 Переваги термодинамічного аналізу металургійних процесів за показником вільної енергії Гіббса

Термодинамічна вільна енергія, яку зазвичай називають енергією Гіббса, є однією з міждисциплінарних концепцій, завдяки якій можливо оцінити взаємозв'язки між різними властивостями та яку можливо використовувати у якості рушійної сили хімічної системи до рівноваги в моделях процесу [101, 102]. На рис. 2.1 показано об'ємний елемент безперервної реакційної системи, що взаємодіє з навколишнім середовищем. На систему впливають її теплові умови (температура і тиск), а також хімічні процеси, які відбуваються в об'ємному елементі. Крім того, для комплексної термохімічної обробки системи необхідно враховувати тепломасообмін через межі елемента об'єму.

Повний диференціал функції Гіббса має вигляд:

$$dG = -SdT + Vdp + \sum_{k=1}^N \mu_k dn_k + \sum_i F_i dx_i \quad (2.1)$$

де S позначає ентропію, Дж/К;

V - об'єм системи, м³; μ_k – хімічний потенціал виду (k),

T – температура, К;

p – тиск, Па;

n_k – молярна кількість хімічних речовин, моль.

Останній термін ($F_i dx_i$) відноситься до додаткових узагальнених ефектів роботи.

У багатьох фізичних обставинах потенціали також обмежені іншими факторами, зазвичай пов'язаними з роботою. Тоді можна застосувати

несуттєві обмеження для хімічних потенціалів разом із співвідношеннями балансу маси [101, 102]. Додаткові умови виникають із зазначеної роботи чи енергетичного ефекту або зумовлені кінетичними умовами реакції [103-106].

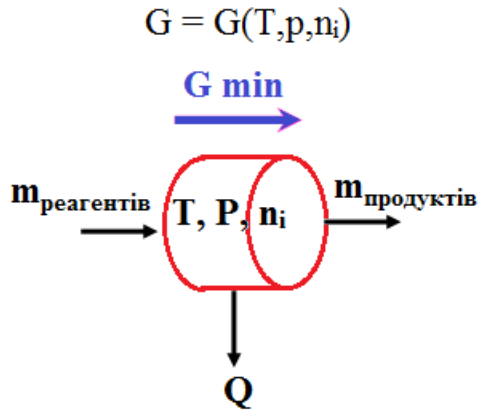


Рисунок 2.1 - Елемент безпервної реакційної системи, що взаємодіє з навколишнім середовищем

Мінімізація енергії Гіббса вимагає використання хімічних потенціалів μ_k (часткових молярних енергій Гіббса) складових системи.

Рівняння, що керують хімічними потенціалами та їхніми відповідними обмеженнями в багатозфазній системі, можна вивести таким чином [103-106]:

$$\mu_k = \sum_{j=1}^I a_{kj} \pi_j; (k = 1, 2, \dots, N), \quad (2.2)$$

$$\sum_{k=1}^N a_{kj} n_k - \beta_j = 0; (j = 1, 2, \dots, I), \quad (2.3)$$

де N – кількість різних хімічних складових, утворених з I компонентів системи; π_j представляють хімічні потенціали компонентів у системі, а рівняння (2.3) окрім обмежень балансу маси включає необхідні несуттєві умови, такі як електронейтральність, збереження площі поверхні, метастабільність даної складової тощо.

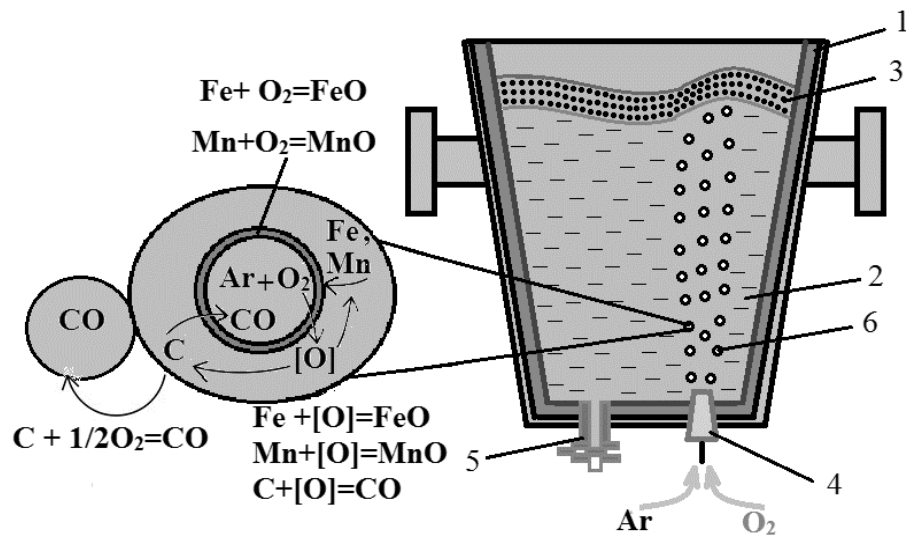
Коли моделювання процесу виконується в термінах хімічних потенціалів складових системи (тобто в термінах мінімальної енергії Гіббса), очевидною перевагою методу є те, що результати розрахунку отримуються у вигляді властивості термохімічного стану, що у випадку оцінювання вільної енергії Гіббса вказує на можливість перебігу тих чи інших хімічних процесів. Таким чином, можна прослідкувати потенціал різних елементів чи речовин до взаємоперетворення з точки зору характеристик системи, таких як температура чи зміна тиску.

2.2 Аналіз можливості протікання реакції за участю кисню на межі фаз, що взаємодіють між собою у сталюванні

При продуванні рідкої металевої ванни бульбашками з газовою сумішшю системи «кисень-аргон» на поверхні цих бульбашок, що зустрічаються з рідким металом відбуваються хімічні реакції. Основний компонент розплаву – залізо, а також наявний у розплаві марганець перетворюються під дією кисню на окисли, що можуть покривати бульбашку оксидною плівкою; вміст карбону невеликий, бульбашці потрібно дістатися до нього, проте при «зустрічі» з карбоном відбувається окислення останнього як оксидною плівкою на поверхні бульбашки, так і газоподібним киснем з утворенням CO, яке або виділяється у самостійну фазу - бульбашку CO, або може поглинатися бульбашкою продувної суміші, бо та, відносно до CO, є «вакуумом»; крім того окислення вище вказаних компонентів може відбуватися розчиненням у металевому розплаві киснем (рис. 2.2).

На першому етапі у роботі було проведено дослідження особливостей окислення домішок при донному продуванні залізовуглецевого розплаву кисеньвмісним газовим потоком. З позиції фізичної хімії та термодинамічного аналізу систему, що розглядається, умовно можна розділити на наступні ділянки: газова бульбашка – метал, газова бульбашка –

шлак, метал – шлак. Для кожної ділянки характерне протікання хімічних реакцій (таблиця 2.1).



1 - ківш; 2 - рідка сталь; 3 - шлаковий розплав; 4 - продувний донний блок; 5 - шиберний затвор для випуску металу; 6 - бульбашки заповнені сумішшю технологічних газів, що включає кисень

Рисунок 2.2 - Схематичне зображення технологічної операції з рафінування сталі у ковші сумішшю технологічних газів, що включає кисень на етапі позапічної обробки: [107].

Таблиця 2.1 – Рівняння хімічних реакцій, що протікають на різних ділянках хімічної системи

№	Ділянка протікання реакції	Хімічне рівняння
1	2	3
1	Газова бульбашка – метал	$1/2 \{O_2\} = [O]$
2		$1/2 \{O_2\} + [Fe] = (FeO)$
3		$1/2 \{O_2\} + [Mn] = (MnO)$
4		$\{O_2\} + [Si] = (SiO_2)$
5		$1/2 \{O_2\} + [C] = \{CO\}$
6		$\{O_2\} + [C] = \{CO_2\}$

Продовження таблиці 2.1

1	2	3
7	Газова бульбашка – метал	$\{O_2\} + [S] = \{SO_2\}$
8		$5/2 \{O_2\} + 2[P] = (P_2O_5)$
9		$1/2 \{O_2\} + \{CO\} = \{CO_2\}$
10		$[C] + \{CO_2\} = 2 \{CO\}$
11		$[O] + \{CO\} = \{CO_2\}$
12		$[C] + [O] = \{CO\}$
13		$[C] + 2[O] = \{CO_2\}$
14	Об'єм металеві ванни	$[Fe] + [O] = (FeO)$
15		$[Mn] + [O] = (MnO)$
16		$[Si] + 2[O] = (SiO_2)$
17		$2[P] + 5[O] = (P_2O_5)$
18		$(FeO) + [C] = \{CO\} + [Fe]$
19		$(MnO) + [C] = \{CO\} + [Mn]$
20		$[Mn] + (FeO) = (MnO) + [Fe]$
21		$[Si] + 2(FeO) = (SiO_2) + 2[Fe]$
22		$2[Mn] + (SiO_2) = 2(MnO) + [Si]$
23	Газова бульбашка - шлак	$1/2 \{O_2\} + 2(FeO) = (Fe_2O_3)$
24		$1/2 \{O_2\} + 3(FeO) = (Fe_3O_4)$
25		$\{CO\} + (FeO) = \{CO_2\} + [Fe]$
26		$\{CO_2\} + 2(FeO) = \{CO\} + (Fe_2O_3)$

Для кожної з хімічних реакцій було розраховано константи рівноваги відповідно до наявних в літературі рівнянь залежності від температури для умов газоподібних та розчинених у металі речовин. На наведених нижче рисунках 2.3 – 2.5 відображена залежність енергії Гіббса від температури для класичного виразу [101-104]:

$$\Delta G = R \cdot T \cdot \lg K_p \quad (2.4)$$

де R – газова постійна, Дж/моль К; T – температура, К; $\lg K_p$ – логарифм константи рівноваги, розрахований за [101-104].

З представлених на рисунках 2.3 – 2.5 даних можна зробити висновок, що за умов які розглядаються, можливі всі реакції окрім (10), (17), (22), (25) (див. табл. 2.1).

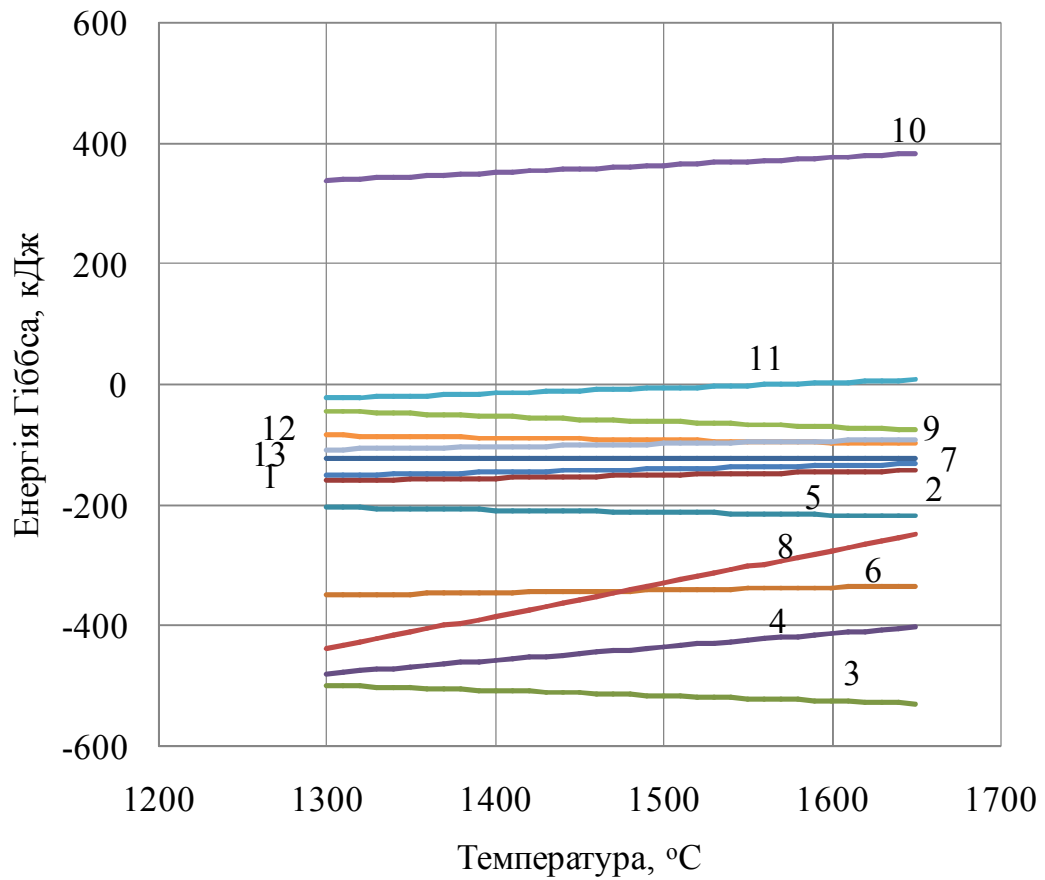


Рисунок 2.3 - Залежність енергії Гіббса від температури для ділянки «газова бульбашка - метал» (номери реакцій відображені біля ліній) [107]

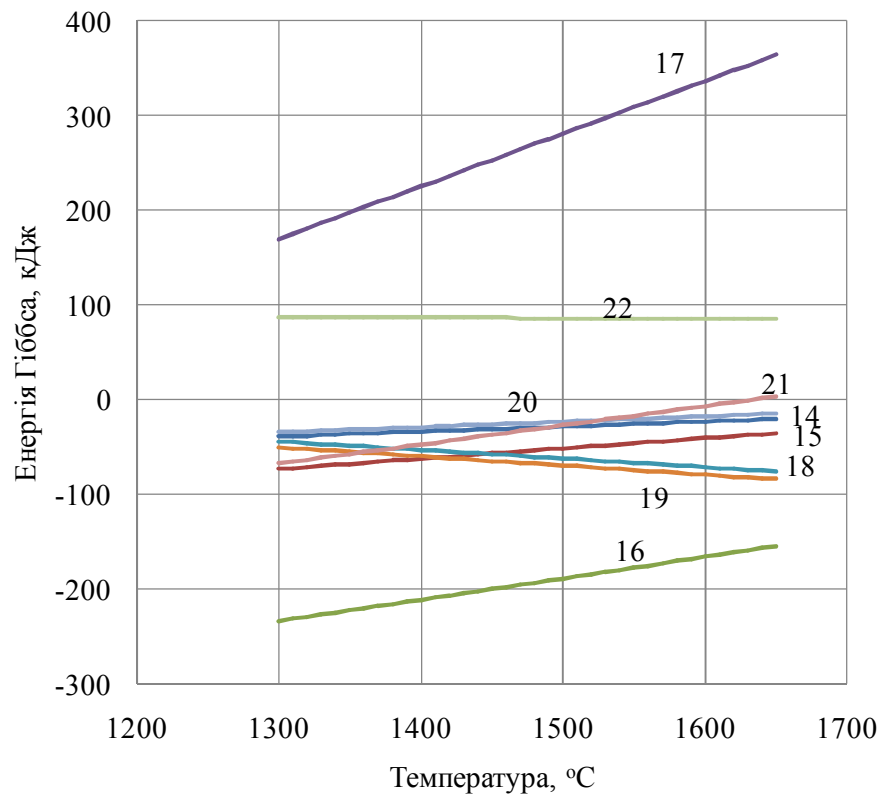


Рисунок 2.4 - Залежність енергії Гіббса від температури для ділянки «об'єм металевої ванни» (номери реакцій відображені біля ліній) [107]

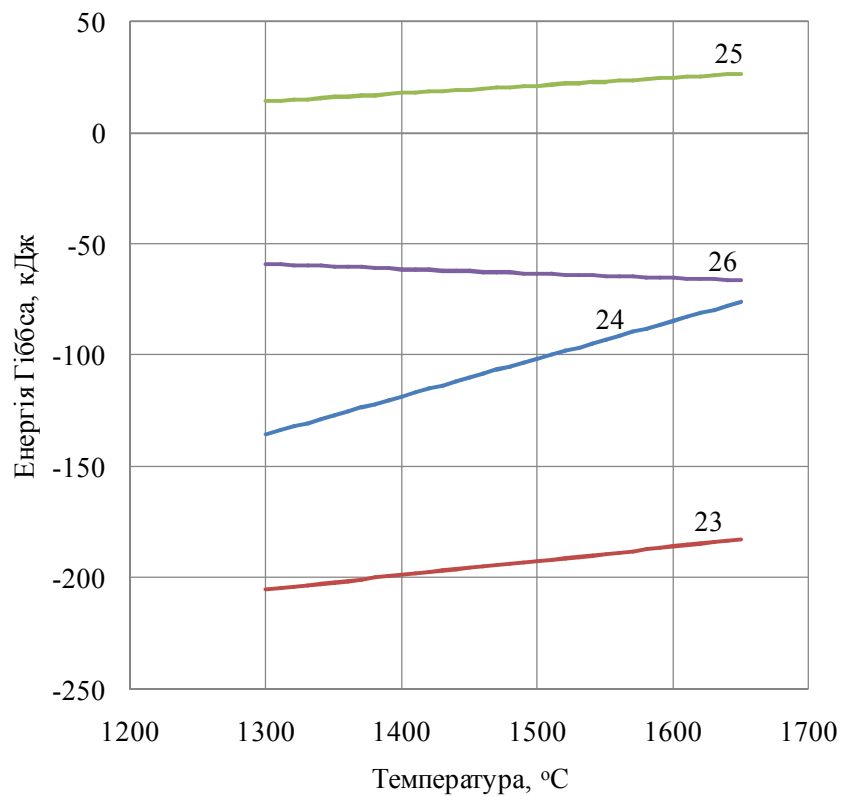
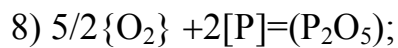
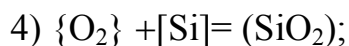


Рисунок 2.5 - Залежність енергії Гіббса від температури для ділянки «шлак – газова бульбашка» (номери реакцій відображені біля ліній) [107]

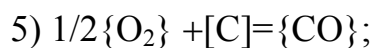
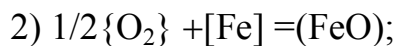
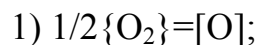
Відповідно до отриманих даних можна зробити висновок, що за температур проведення обробки металевого розплаву у сталюковші (близько 1500 °C) серед реакцій, що аналізуються, мають від'ємну величину вільної енергії Гіббса, а значить умови для активного протікання в прямому напрямку утворення продуктів реакції:

а) у зоні «газова бульбашка – метал»:

- найкращі умови для реакцій:



- середні умови для протікання реакцій:



- реакція 9) $\frac{1}{2} \{O_2\} + \{CO\} = \{CO_2\}$ має невеликі можливості протікання, інші реакції не мають термодинамічних умов для протікання:



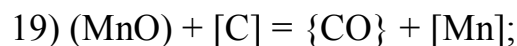
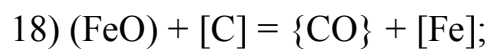
б) у зоні «об'єм металевої ванни» :

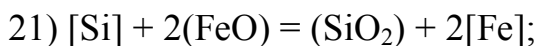
- кращі умови для протікання створюються для реакції:



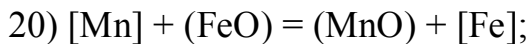
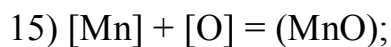
причому зниження температури сприятиме покращенню умов для її перебігу.

- середні умови протікання створюються для реакцій:

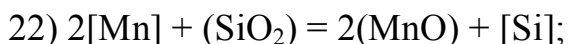




- відносно низьку вірогідність протікання мають реакції:

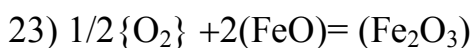


- зовсім не мають термодинамічних умов для перебігу реакції:



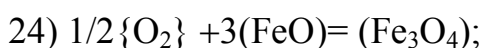
в) у зоні «газова бульбашка – шлак»:

- найкращі умови для перебігу реакції:



й зі зменшенням температури умови покращуватимуться;

- середні умови для перебігу реакції:



- реакція 26) $\{ \text{CO}_2 \} + 2(\text{FeO}) = \{ \text{CO} \} + (\text{Fe}_2\text{O}_3)$ в принципі теж може відбуватися, проте її можливість перебігу невелика;

- реакція 25) $\{ \text{CO} \} + (\text{FeO}) = \{ \text{CO}_2 \} + [\text{Fe}]$ не має термодинамічних умов для перебігу.

2.3 Дослідження впливу гідростатичного тиску у ковші на показник вільної енергії Гіббса реакцій між різними фазами

Однак в рівнянні (2.1) при розрахунку можливості протікання реакції ніяк не враховано вплив умов перебігу реакції, а саме вплив тиску на систему, яка містить речовини у газовому стані. Бульбашка газу протягом підйому з днища до поверхні металу піддається різному впливу тиску середовища зумовленому густиною та поверхневим натягом металу у ковші. Тому для наближення розрахунків умов протікання реакцій до реальних було використано рівняння [101-104] :

$$\Delta G_T = \Delta n \cdot R \cdot T \cdot \ln P - R \cdot T \cdot \ln K_p \quad (2.5)$$

де Δn – різниця числа кіломолей газової суміші, що беруть участь у реакції, R – газова постійна, Дж/моль К; T – абсолютна температура, К; $\ln P$ – логарифм тиску, що впливає на систему, $\ln K_p$ – логарифм константи рівноваги відповідної реакції (розрахований за [101-104]).

Гідростатичний тиск, що впливає на реакційну систему знайдемо з рівняння:

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (2.6)$$

де ρ – густина середовища (прийmemo для сталі 7000 кг/м³ і для шлаку 2500 кг/м³), g – гравітаційна постійна м/с²; h – глибина ковшу з металевим розплавом, на якій розглядається вплив тиску, м.

Промисловий 250-т сталерозливний ківш, який є об'єктом, що моделюється, має наступні геометричні параметри робочого простору: висота – 4350 мм; діаметр верхньої частини – 4200 мм; діаметр донної частини – 3570 мм. (При цьому, для розрахунку впливу гідростатичного тиску необхідно врахувати, що для умов ефективного проведення позапічної обробки розплавів висота вільного борту повинна складати 500 мм, а товщина шару синтетичного шлаку – на рівні 300 мм).

Для оцінки впливу тиску середовища протягом періоду підйому газової бульбашки розрахунки були проведені для умов дна ковшу, 25%, 50%, 75% висоти ковшу від днища та на межі розділу метал – шлак (відповідні зазначеним параметрам висоти значення гідростатичного тиску представлені в таблиці 2.2).

Таблиця 2.2 – Зміна гідростатичного тиску по висоті 250-т сталерозливного ковша

Висота шару металу й шлаку в ковші	дно	25% висоти розплаву	50% висоти розплаву	75% висоти розплаву	Межа розділу металевої та шлакової фаз
Тиск, Па	251136,00	190225,71	129246,75	68336,46	7357,50

Результати розрахунку впливу надлишкового гідростатичного тиску для умов спливання бульбашки газу, що містить кисень, у 250-т сталерозливному ковші наведені на рис. 2.6 – 2.20.

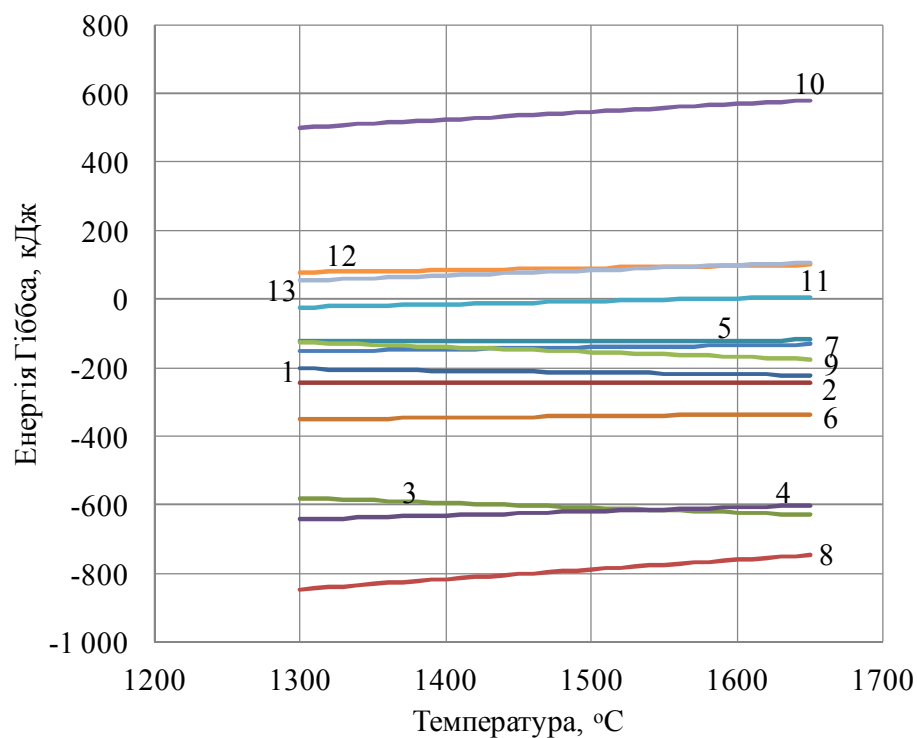


Рисунок 2.6 - Залежність енергії Гіббса від температури для ділянки «газова бульбашка - метал» за умов врахування гідростатичного тиску – рівень дно (номери реакцій відображені біля ліній) [107]

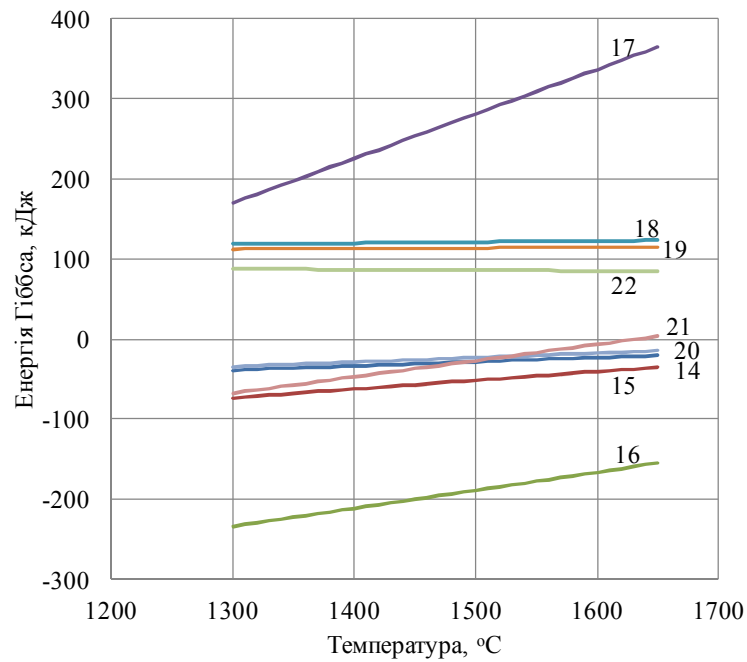


Рисунок 2.7 - Залежність енергії Гіббса від температури для ділянки «об'єм металевої ванни» за умов врахування гідростатичного тиску – рівень дно (номери реакцій відображені біля ліній) [107]

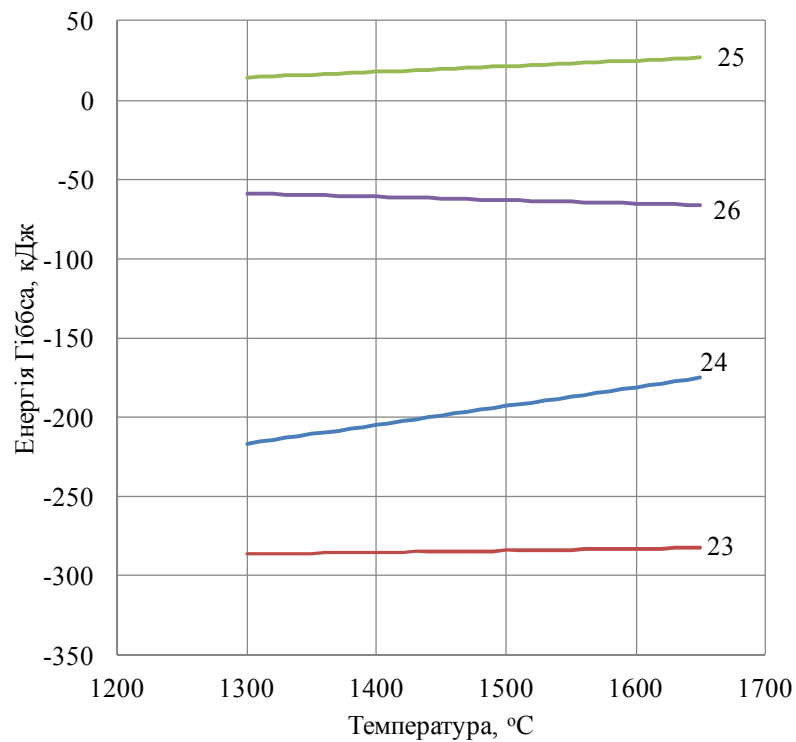


Рисунок 2.8 - Залежність енергії Гіббса від температури для ділянки «шлак – газова бульбашка» за умов врахування гідростатичного тиску – рівень дно (номери реакцій відображені біля ліній) [107]

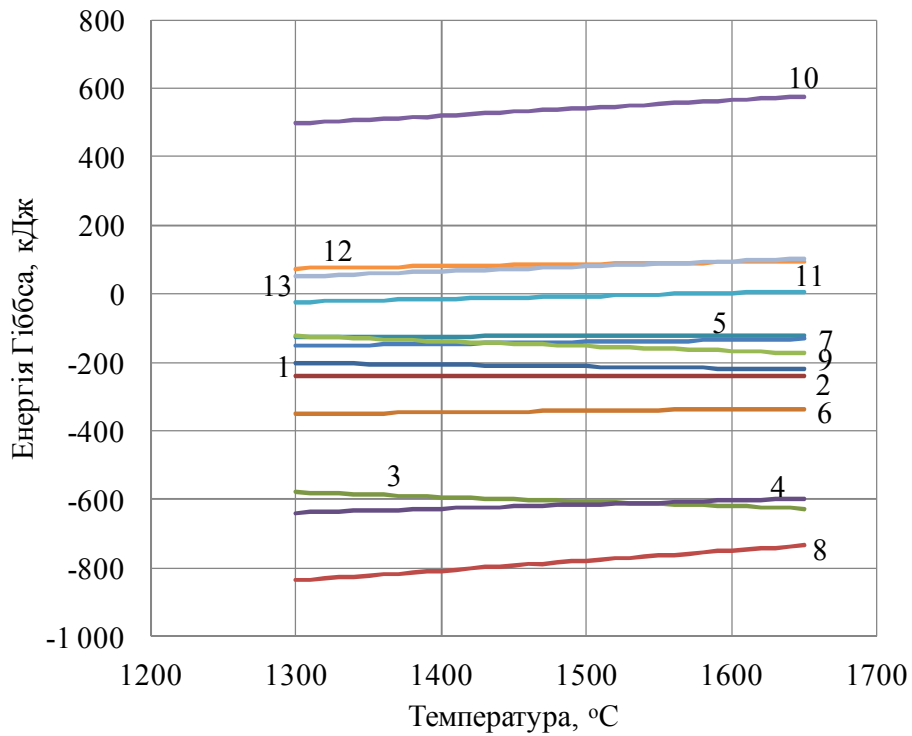


Рисунок 2.9 - Залежність енергії Гіббса від температури для ділянки «газова бульбашка - метал» за умов врахування гідростатичного тиску – рівень 25% від дна (номери реакцій відображені біля ліній) [107]

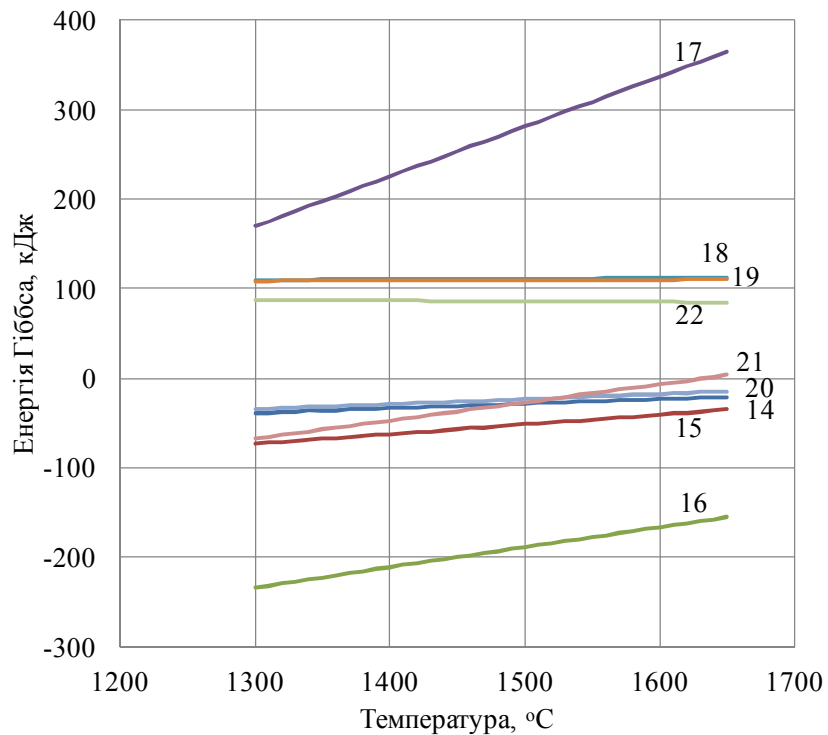


Рисунок 2.10 - Залежність енергії Гіббса від температури для ділянки «об'єм металевої ванни» за умов врахування гідростатичного тиску – рівень 25% від дна (номери реакцій відображені біля ліній) [107]

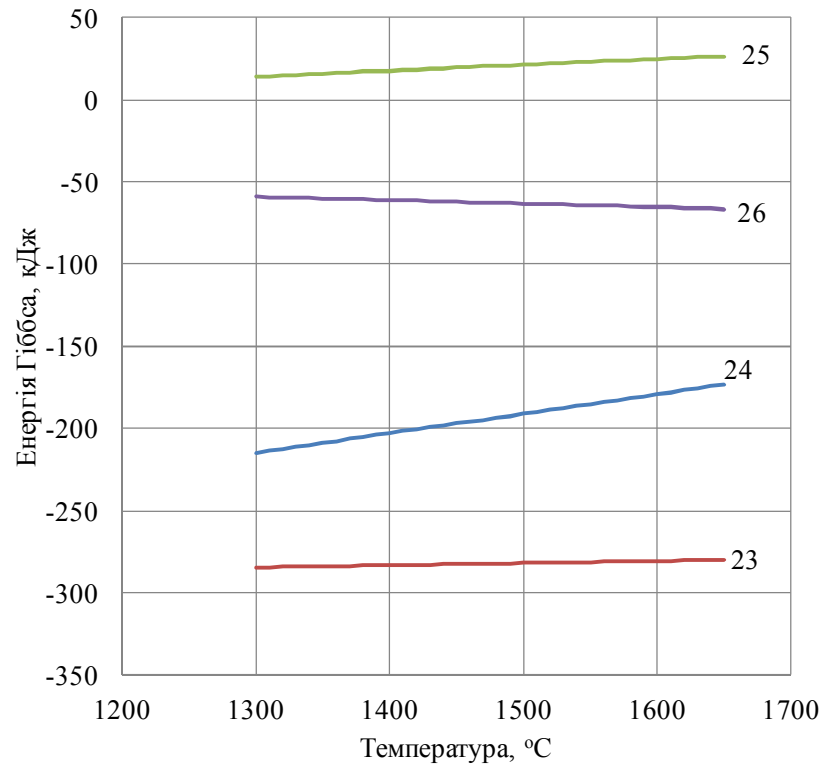


Рисунок 2.11 - Залежність енергії Гіббса від температури для ділянки «шлак – газова бульбашка» за умов врахування гідростатичного тиску – рівень 25% від дна (номери реакцій відображені біля ліній) [107]

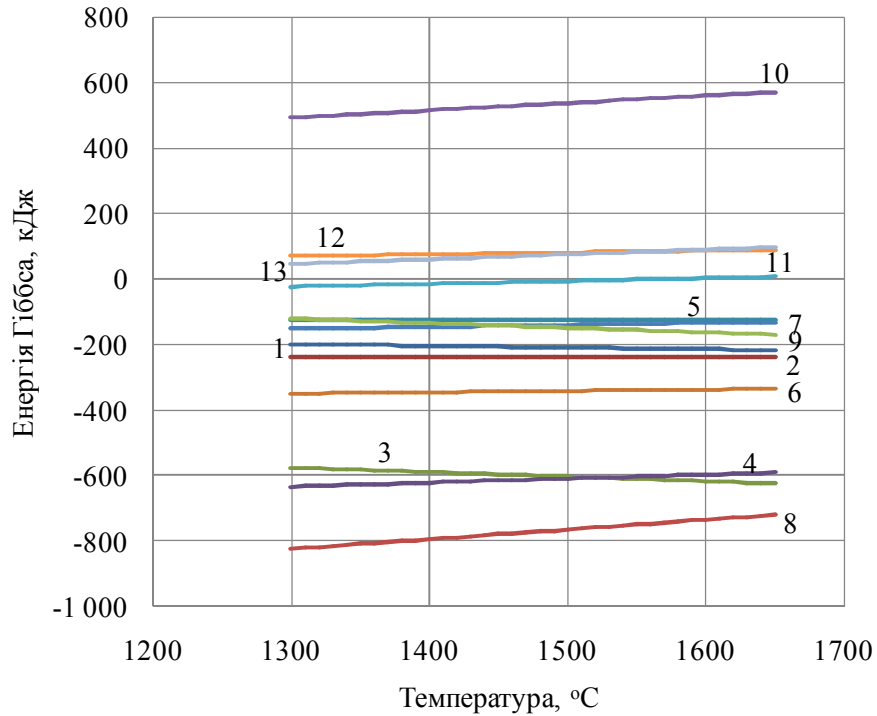


Рисунок 2.12 - Залежність енергії Гіббса від температури для ділянки «газова бульбашка - метал» за умов врахування гідростатичного тиску – рівень 50% від дна (номери реакцій відображені біля ліній) [107]

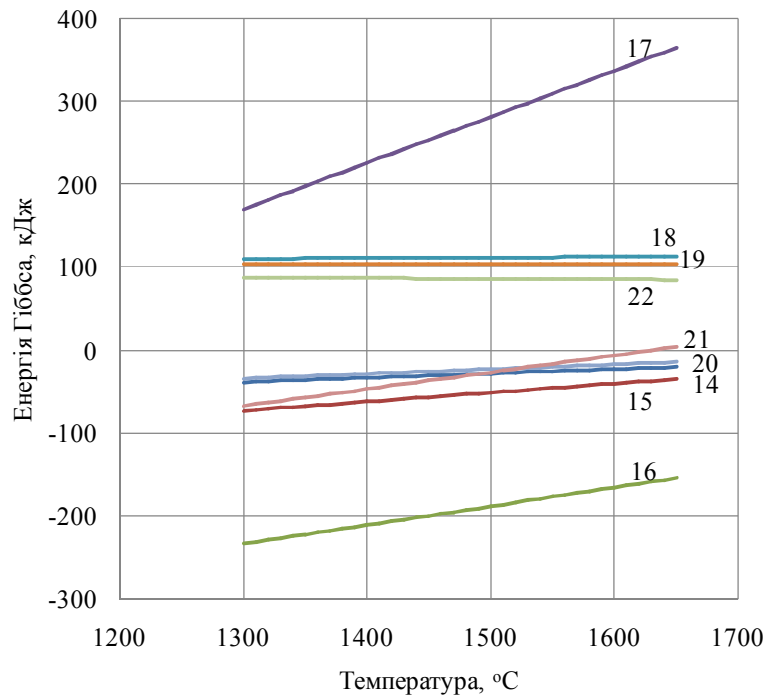


Рисунок 2.13 - Залежність енергії Гіббса від температури для ділянки «об'єм металу» за умов врахування гідростатичного тиску – рівень 50% від дна (номери реакцій відображені біля ліній) [107]

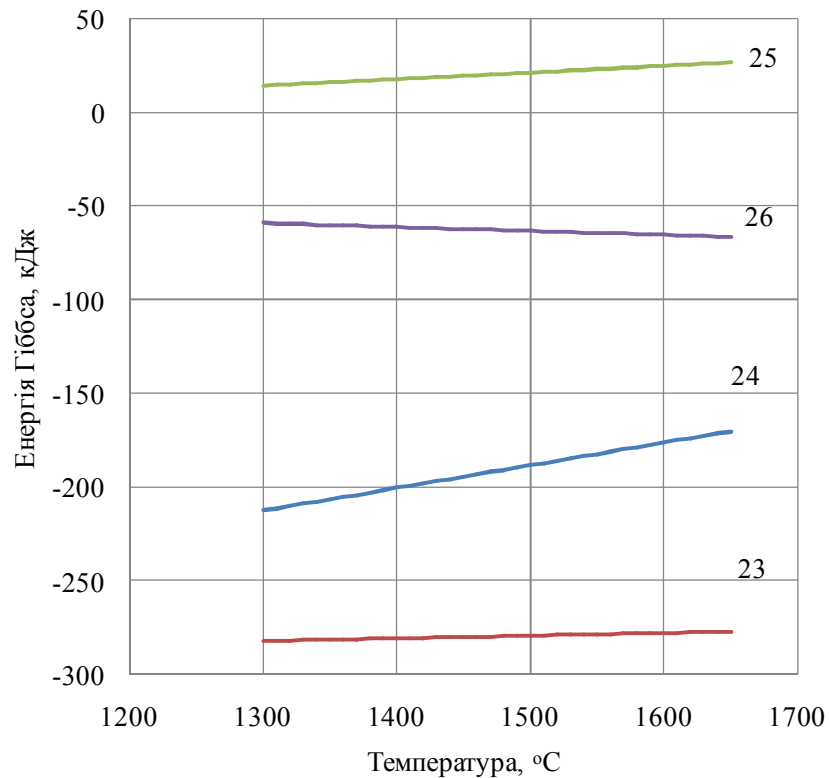


Рисунок 2.14 - Залежність енергії Гіббса від температури для ділянки «шлак – газова бульбашка» за умов врахування гідростатичного тиску – рівень 50% від дна (номери реакцій відображені біля ліній) [107]

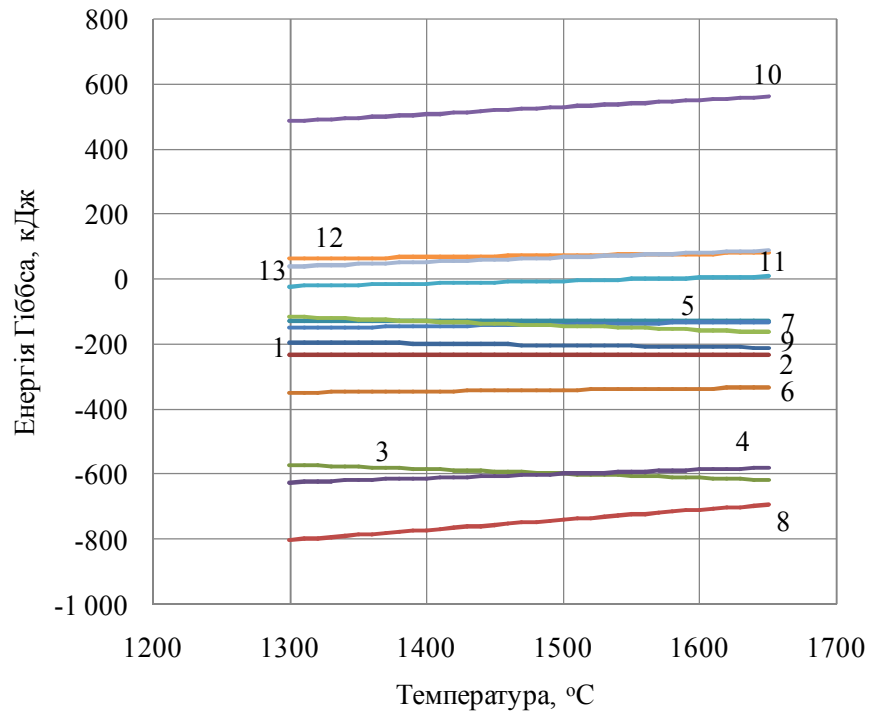


Рисунок 2.15 - Залежність енергії Гіббса від температури для ділянки «газова бульбашка - метал» за умов врахування гідростатичного тиску – рівень 75% від дна (номери реакцій відображені біля ліній) [107]

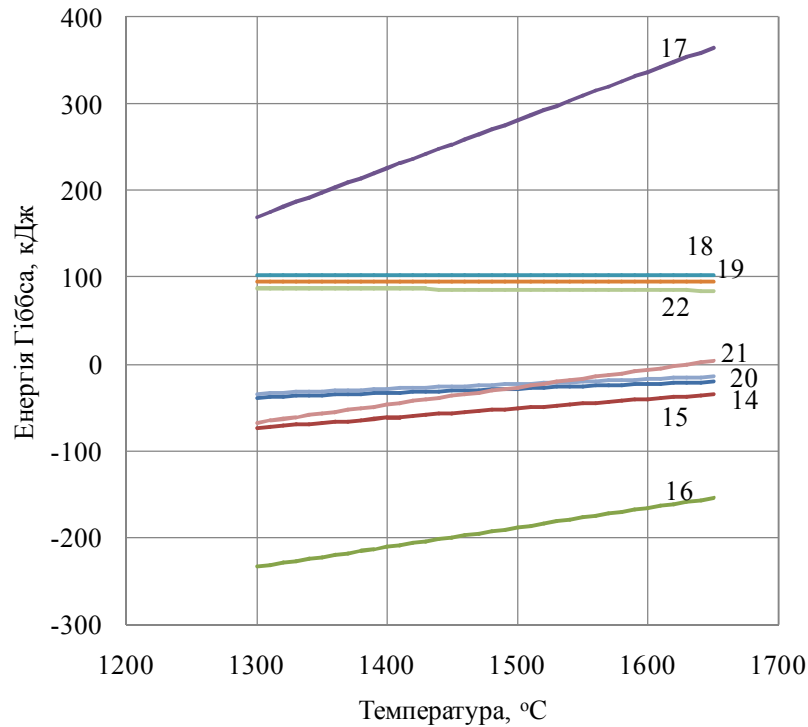


Рисунок 2.16 - Залежність енергії Гіббса від температури для ділянки «об'єм металевої ванни» за умов врахування гідростатичного тиску – рівень 75% від дна (номери реакцій відображені біля ліній) [107]

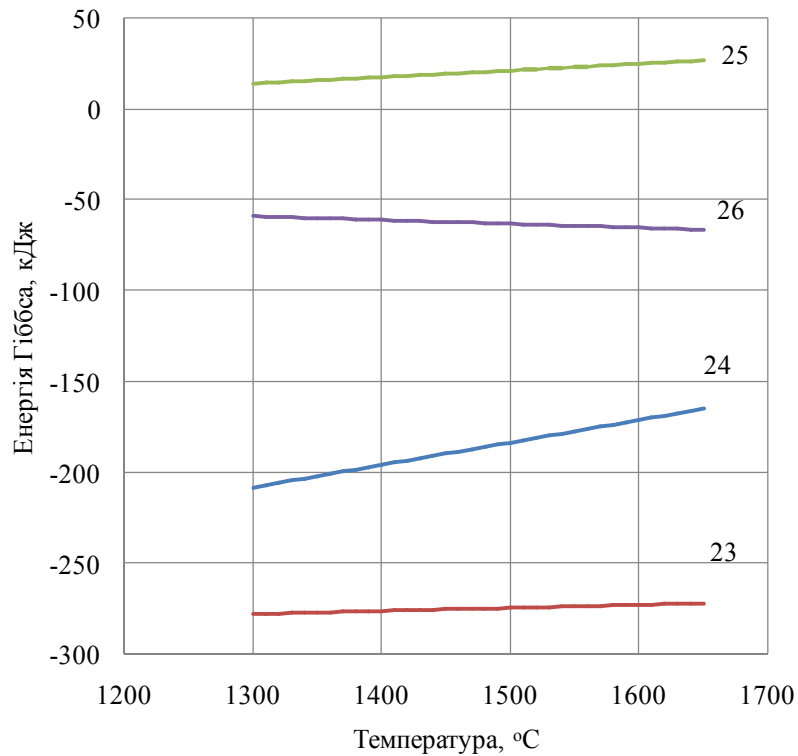


Рисунок 2.17 - Залежність енергії Гіббса від температури для ділянки «шлак – газова бульбашка» за умов врахування гідростатичного тиску – рівень 75% від дна (номери реакцій відображені біля ліній) [107]

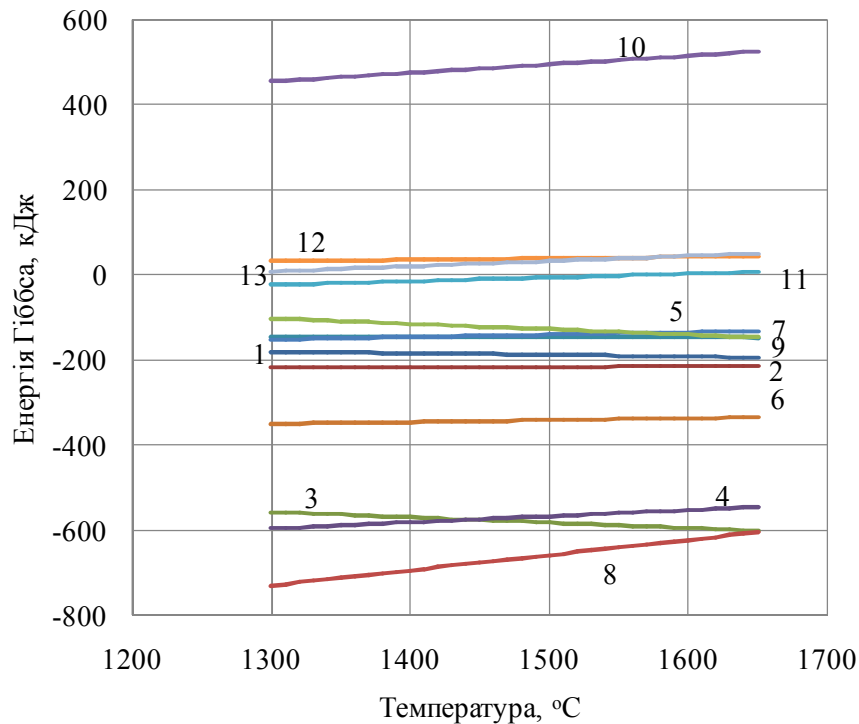


Рисунок 2.18 - Залежність енергії Гіббса від температури для ділянок «газова бульбашка - метал» за умов врахування гідростатичного тиску – межа розподілу метал - шлак (номери реакцій відображені біля ліній) [107]

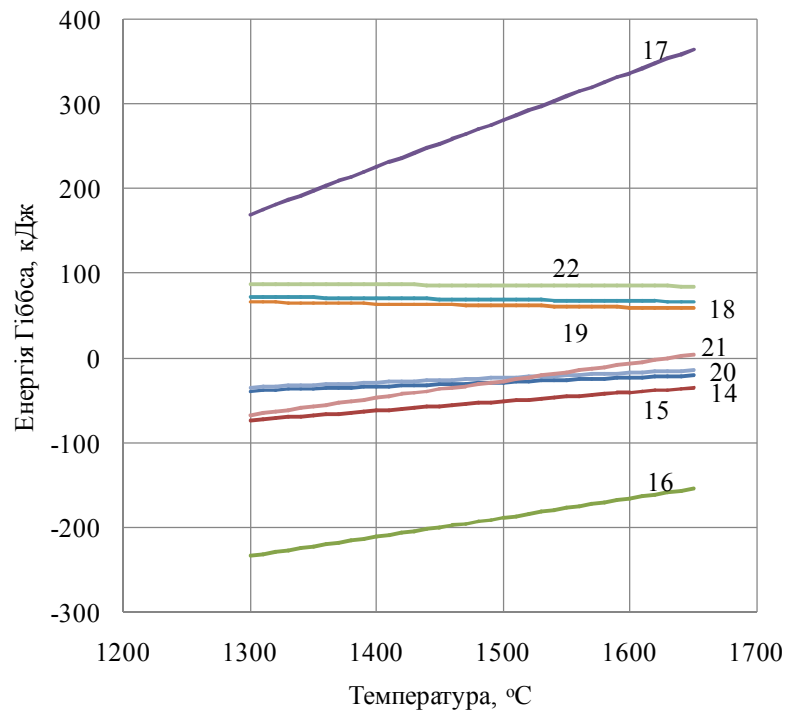


Рисунок 2.19 - Залежність енергії Гіббса від температури для ділянки «об'єм металевої ванни» за умов врахування гідростатичного тиску – межа розподілу метал - шлак (номери реакцій відображені біля ліній) [107]

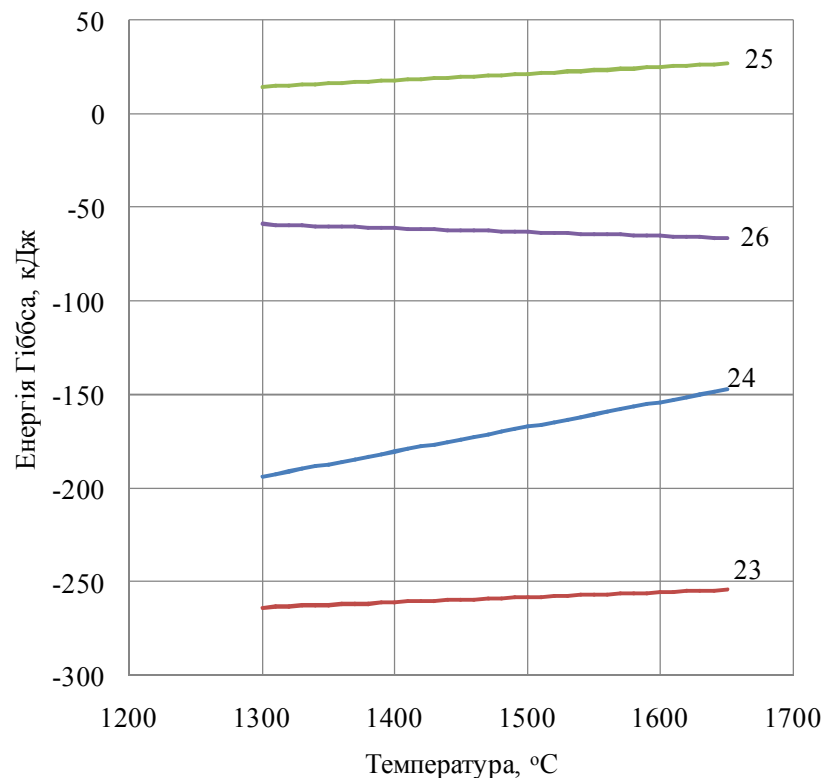


Рисунок 2.20 - Залежність енергії Гіббса від температури для ділянки «шлак – газова бульбашка» за умов врахування гідростатичного тиску – межа розподілу метал - шлак (номери реакцій відображені біля ліній) [107]

Необхідно відмітити, що тиск впливає лише за умов участі газової фази в реакції та за умов різної кількості газів до та після реакції. Тобто для реакцій, що оцінювалися (наведені вище), тиск впливатиме на наступні:

ділянка «Газова бульбашка – метал»:

- 1) $1/2 \{O_2\} = [O]$;
- 2) $1/2 \{O_2\} + [Fe] = (FeO)$;
- 3) $1/2 \{O_2\} + [Mn] = (MnO)$;
- 4) $\{O_2\} + [Si] = (SiO_2)$;
- 5) $1/2 \{O_2\} + [C] = \{CO\}$;
- 8) $5/2 \{O_2\} + 2[P] = (P_2O_5)$.
- 9) $1/2 \{O_2\} + \{CO\} = \{CO_2\}$;
- 10) $[C] + \{CO_2\} = 2\{CO\}$;
- 12) $[C] + [O] = \{CO\}$;
- 13) $[C] + 2 [O] = \{CO_2\}$;

ділянка «Об'єм металеві ванни»

- 18) $(FeO) + [C] = \{CO\} + [Fe]$;
- 19) $(MnO) + [C] = \{CO\} + [Mn]$;

ділянка «Газова бульбашка – шлак»

- 23) $1/2 \{O_2\} + 2(FeO) = (Fe_2O_3)$;
- 24) $1/2 \{O_2\} + 3(FeO) = (Fe_3O_4)$.

За умов підвищення тиску, що відбувається при заглибленні у ківш через значно вищу густину розплавів у порівнянні з газовою фазою, реакція буде намагатися «скомпенсувати» такий вплив шляхом зменшення об'єму газу в системі і її напрямок буде спрямований в той бік, де утворюється менше газу. Тобто під час впливу підвищеного тиску реакції (1), (2), (3), (4), (8), (9), (23) та (24) активніше проходитимуть в прямому напрямку з утворенням продуктів реакції й для них показник ΔG стає більш від'ємним. Реакції (5), (10), (12), (13), (18), (19) навпаки будуть проходити у зворотному напрямку й для них величина показника ΔG більше наближається до

позитивних чисел. І чим глибше занурення в ківш тим сильніше буде такий вплив. Для можливості підтвердження зазначених припущень та оцінки такого впливу у таблиці 2.3 наведені результати розрахунків показника вільної енергії Гіббса для температури 1500 °С без урахування гідростатичного тиску та з урахування тиску на різних глибинах ковшу.

Таблиця 2.3 – Показник вільної енергії Гіббса (dG) для оцінюваних реакцій за температури 1500 °С при урахування впливу тиску на різних глибинах ковшу

Номер реакції	dG за різних умов впливу тиску (зміна можливості протікання реакцій , %)					
	Без урахування тиску	Дно ковша	25% від дна	50% від дна	75% від дна	Межа розділу метал - шлак
1	2	3	4	5	6	7
1	-122,23	-213,87 (+74,9)	-211,83	-208,98	-204,28	-187,85
2	-150,42	-242,06 (+60,9)	-240,02	-237,17	-232,47	-216,05
3	-516,21	-607,85 (+17,8)	-605,80	-602,95	-598,26	-581,83
4	-435,36	-618,64 (+42,1)	-614,54	-608,85	-599,45	-566,60
5	-212,34	-120,70 (-43,2)	-122,75	-125,60	-130,29	-146,72
6	-341,14	-341,14	-341,14	-341,14	-341,14	-341,14
7	-140,27	-140,27	-140,27	-140,27	-140,27	-140,27
8	-329,95	-788,16 (+138,9)	-777,92	-763,68	-740,20	-658,06

Продовження таблиці 2.3

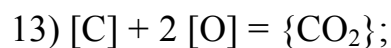
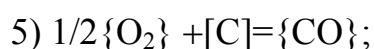
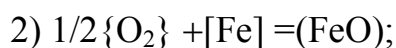
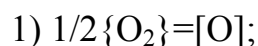
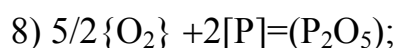
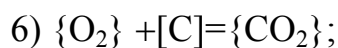
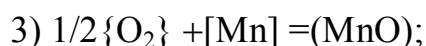
1	2	3	4	5	6	7
9	-62,10	-153,74 (+147,7)	-151,70	-148,85	-144,15	-127,72
10	362,86	546,14 (-50,5)	542,04	536,35	526,95	494,10
11	-6,27	-6,27	-6,27	-6,27	-6,27	-6,27
12	-92,62	90,66 (-197,8)	86,57	80,87	71,48	38,62
13	-98,89	84,39 (-185,3)	80,30	74,60	65,20	32,35
14	-28,33	-28,33	-28,33	-28,33	-28,33	-28,33
15	-51,48	-51,48	-51,48	-51,48	-51,48	-51,48
16	-188,60	-188,60	-188,60	-188,60	-188,60	-188,60
17	281,20	281,20	281,20	281,20	281,20	281,20
18	-62,10	121,18 (-295,1)	111,39	111,39	101,99	69,14
19	-69,46	113,82 (-263,86)	109,73	104,03	94,63	61,78
20	-23,16	-23,16	-23,16	-23,16	-23,16	-23,16
21	-26,92	-26,92	-26,92	-26,92	-26,92	-26,92
22	85,97	85,97	85,97	85,97	85,97	85,97
23	-192,35	-284,00 (+47,65)	-281,95	-279,10	-274,40	-257,98
24	-101,47	-193,11 (+90,3)	-191,07	-188,22	-183,52	-167,09
25	21,37	21,37	21,37	21,37	21,37	21,37
26	-63,18	-63,18	-63,18	-63,18	-63,18	-63,18

Для максимальної глибини (дно ковша) показані відхилення розрахованого показника від показника без урахування тиску у відсотках (позитивне відхилення відповідає активізації реакції у прямому напрямку, а негативне – припинення можливості протікання реакції за даних умов). Відповідно до представлених результатів розрахунків можна зробити висновок, що за умов урахування гідростатичного тиску такі реакції, як (12), (13) та (19) втрачають термодинамічну можливість протікання для всіх проаналізованих глибин розплаву (величина вільної енергії Гіббса з негативною стає позитивною). Для реакцій (9), (24), (1), (2), (23), (4), (3) (розташовані у порядку зниження приросту показнику) відмічено за результатами розрахунку значне покращення можливості протікання реакцій.

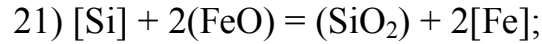
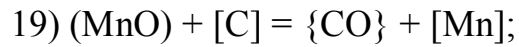
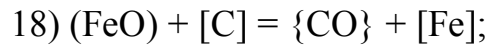
Висновки за розділом 2

З наведених результатів розрахунків на рисунках 2.6 – 2.20 та у таблиці 2.3 можна зробити висновок, що:

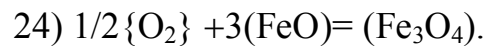
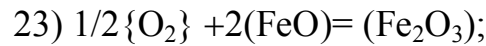
1. Достатні для перебігу можливих реакцій у розплавленому об'ємі сталі при продуванні газоподібним киснем умови складаються у зоні «газова бульбашка – метал» для реакцій (розташовані відповідно до зниження можливості протікання):



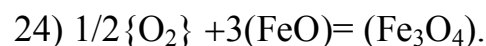
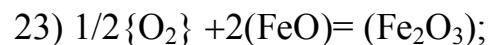
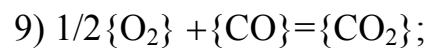
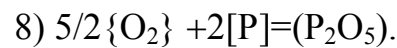
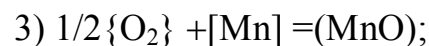
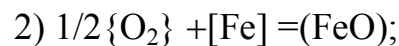
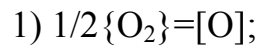
у зоні «об'єм металевої ванни»:



у зоні «газова бульбашка – шлак» :

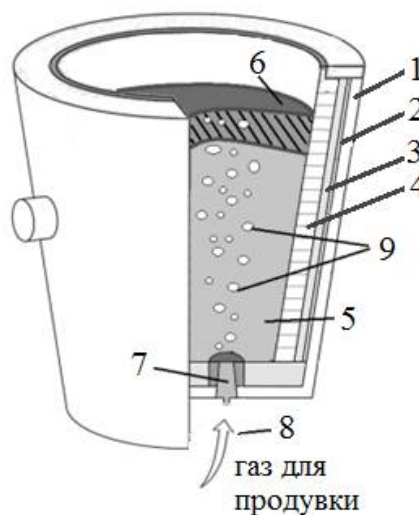


2. При продувці розплаву сталі через днище у бульбашковому режимі, газовою сумішшю, що містить у своєму складі кисень, завдяки впливу гідростатичного тиску розплаву активніше протікатимуть реакції окислення за участю газоподібного кисню:



Розділ 3. ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ДОННОГО ПРОДУВНОГО БЛОКУ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОДУВКИ СУМІШШЮ ГАЗІВ, ЩО МІСТИТЬ КИСЕНЬ

Процеси обробки металевого розплаву за рахунок продувки нейтральними газами в сучасних виробничих умовах є найбільш розповсюдженим етапом позапічної обробки. Тому на більшості металургійних підприємств сталерозливні ковші обладнані донними продувальними блоками для здійснення продувки. Загальна схема розміщення продувальних блоків у сталерозливному ковші представлена на рис.3.1 [108].



1 – металевий кожух; 2 - шар теплоізоляції; 3 – арматурний шар футерівки; 4 – робочий шар футерівки; 5 – металевий розплав; 6 – шлаковий розплав; 7 – донний продувний блок; 8 – газ для донної продувки; 9 – бульбашки газу в розплаві

Рисунок 3.1 - Схема будови робочого простору сталерозливного ковша

Найбільш розповсюджені конструкції донних продувальних блоків для сталерозливних ковшів представлені на рис. 3.2 [109-111]. Відповідно до досвіду використання донних продувальних блоків у сталерозливних ковшах

на даний момент розповсюдження отримали наступні конструкції: щілинні, пористі та пластинчаті. Проте немає остаточної точки зору що до ефективності певної з конструкцій.

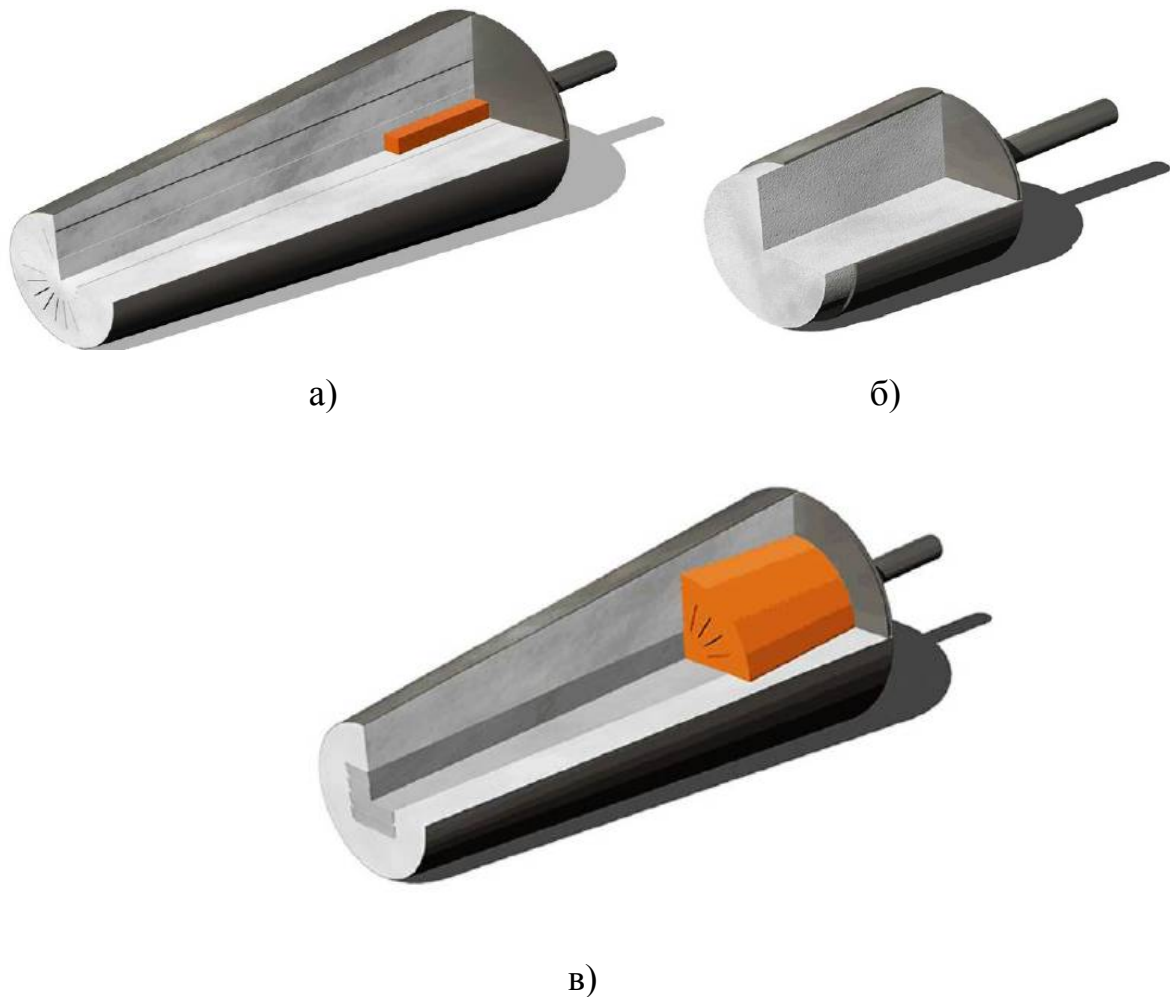


Рисунок 3.2 - Сучасні конструкції донних продувальних блоків для сталерозливних ковшів [4]: а – щілинний тип; б – пористий тип; в – пластинчатий тип

Виходячи з зазначеного вище метою даного розділу роботи є встановлення найбільш ефективної конструкції донного продувального блоку для продувки у сталерозливному ковші. Враховуючи, що поставлена задача є досить складною, то її вирішення потребує проведення низькотемпературного фізичного моделювання з комплексною оцінкою результатів.

3.1. Експериментальна установка і методика проведення досліджень щодо встановлення раціональної конструкції донної продувної вставки

З метою визначення впливу конструктивних параметрів донного продувного блоку на ефективність масообмінних процесів в ванні сталерозливного ковша було проведено визначення основних параметрів, що впливають на даний процес. У якості цільової функції, що визначає ефективність масообмінних процесів в об'ємі розплаву сталерозливного ковша прийнято час гомогенізації.

При фізичному низькотемпературному моделюванні приймаємо, що тривалість τ гомогенізації рідини залежить від наступних параметрів [112]:

- інтенсивності продувки q , м³/с;
- діаметру сопла d_c , м
- рівня рідини h_v , м
- висоти елементарної комірки H_k ,
- густини рідини $\rho_{ж}$, кг/м³
- різниці густин рідини і газу $\Delta\rho$, кг/м³
- прискорення вільного падіння g , м/с²

Функціональна залежність має вигляд:

$$\tau \equiv f(\Delta\rho, \rho_{ж}, h_v, d_v, d_c, g, q) \quad (3.1)$$

З метою визначення масштабу моделювання були визначені основні критерії подоби, що описують процес перемішування розплаву у ковші під дією продувки нейтральним газом (таблиця 3.1). У критеріїв подоби присутні $n = 8$ параметрів, що мають різну фізичну природу. До розмірності параметрів входять $R = 5$ первинних одиниць вимірювання: кг/м³, м, м³/с, с. Тоді загальна кількість безрозмірних комплексів, що визначають розглянуту систему: $\Pi = n - R = 8 - 5 = 3$.

Таблиця 3.1 – Визначення критеріїв подоби для опису гомогенізації рідини (з урахуванням матеріалів викладених у роботах [113, 114])

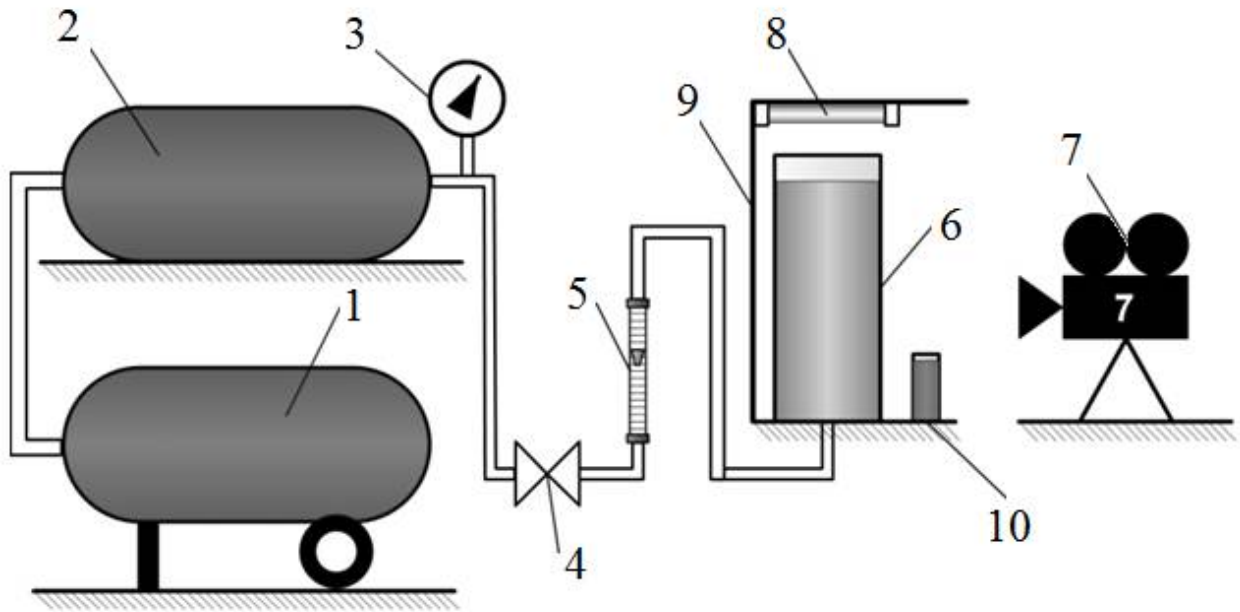
Параметр	Розмірність	Масштаб	Критерій
τ	с	-	$Ho_m = \frac{g \cdot \tau^2}{d_v}$
q	м ³ /с	-	$Q = \frac{q^2}{g \cdot d_v^5}$
g	м/с ²	с	-
d_c	м	-	$D_c = \frac{d_c}{d_v} \neq idem$
d_v	м	м	-
h_v	м	-	$H_v = \frac{h_v}{d_v}$
$\rho_{ж}$	кг/м ³	кг	-
$\Delta\rho$	кг/м ³	-	$P = \frac{\Delta\rho}{\rho_{ж}}$

Враховуючи критерії, отримані в таблиці 3.1 залежність (3.1) перепишеться наступним чином:

$$Ho_m \equiv f(P, H_v, D_c, Q) \quad (3.2)$$

Враховуючи особливості низькотемпературного фізичного моделювання процесу гомогенізації металевого розплаву у сталерозливному ковші була розроблена методика проведення моделювання та установка спеціальної конструкції. Загальна схема експериментальної установки для вивчення особливостей гомогенізації металевого розплаву у ковші при продувці нейтральним газом представлена на рис. 3.3. Відповідно до неї у склад установки входять: компресор, ресивер, манометр, вентиль, ротаметр

PM-0,63, модель елементарної комірки перемішування, відеокамера, штучне освітлення та світлоізолююча камера та контрольний зразок.



1 – компресор; 2 – ресивер; 3 - манометр; 4 - вентиль; 5 – ротаметр РМ-0,63; 6 – модель елементарної комірки перемішування; 7 – відеокамера; 8 – штучне освітлення; 9 – світлоізолююча камера; 10 – контрольний зразок

Рисунок 3.3. Загальна схема експериментальної установки для дослідження гомогенізації ванни при різних варіантах донного дуття

Компресор у складі установки використовується для подавання у ресивер стисненого повітря до заданого тиску. Ресивер служить для утримання великого об'єму стисненого повітря необхідного для плавного введення у рідину. Ротаметр РМ-0,63 та манометр слугують для контролювання витрати стисненого газу та його тиску при здійсненні продувки розплаву. Вентиль використовується для зміни витрати стисненого газу на продувку. У якості моделі елементарної комірки перемішування взята циліндрична ємність виконана з плексигласу, яка конструктивно складається з камери для проведення моделювання та патрубку, в якому встановлюється модель донного продувального блоку. З метою отримання якісного відеозапису

експериментів модель елементарної комірки перемішування була встановлена в світлоізолюючій камері, яка виключає заломлення променів світла в стінках моделі. Штучне освітлення дозволяє отримати направлений потік світла на модель елементарної комірки перемішування.

У якості рідини-трасера, що імітує хімічну неоднорідність розплаву використовували 30 % водний розчин KMnO_4 , у кількості 100 мл. Рідина-трасер вводилася у верхню частину моделі елементарної комірки перемішування. Про гомогенізацію розплаву судили по наблизенню інтенсивності кольору розчину у порівнянні з 3,5 % водним розчином KMnO_4 , що була встановлена з іншого боку прозорої моделі елементарної комірки перемішування розплаву у ковші при продувці нейтральним газом.

Враховуючи особливості низькотемпературного фізичного моделювання з визначення впливу конструктивних особливостей донного продувального блоку на ефективність перемішування розплаву у ковші експериментальні дослідження поділялися на три частини: у першій визначалися особливості впливу розміру характерного перетину продувального блоку на особливості перемішування; у другій проводилось визначення впливу конструкції бульбашкоутворювача продувальної вставки на ефективність перемішування розплаву, що визначалося по зміні часу гомогенізації розплаву; у третій встановили конструкцію додаткової камери змішувача продувних газів.

У першій частині експериментальних досліджень вивчався вплив характерного розміру прохідного каналу донного продувального блоку (L) на час гомогенізації металеві ванни. З цією метою була розроблена конструкція моделі продувального блоку з щілинним прохідним перетином (рис. 3.4). З метою дослідження впливу розміру каналу прохідного перетину на час гомогенізації був розроблений ряд вставок з наступним характерним розміром отвору (L) 0,05; 0,1; 0,5; 8 мм. З метою отримання більш адекватних даних експеримент з кожною моделлю вставки проводився з витратою повітря 0,156; 0,097; 0,032 м³/год.

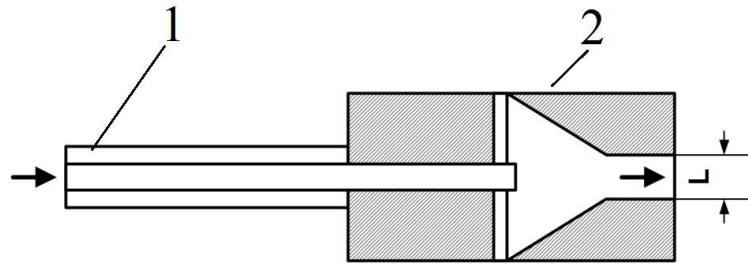


Рисунок 3.4 - Конструкція моделі донного продувного блоку з щілинним прохідним перетином: 1 – фланець; 2 – камера бульбашкоутворювач

У другій частині експериментальних досліджень проводилося визначення впливу конструкції бульбашкоутворювача донної продувальної вставки на час гомогенізації розплаву. Для моделювання використовувалися донні продувальні блоки трьох конструкцій: з канальними бульбашкоутворювачами, щілинними та ненаправленою пористістю (рис. 3.5).

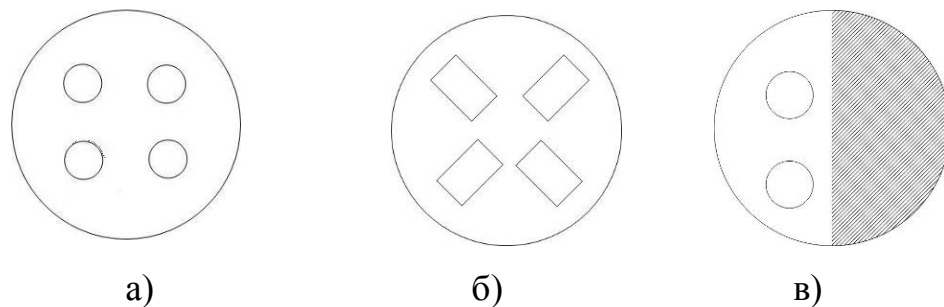


Рисунок 3.5 - Ескіз моделей багатоканальних донних продувальних блоків, що використовувалися для експерименту: а – канальна; б – щілинна; в – з ненаправленою пористістю

Методика проведення експерименту була аналогічною до першої частини, за винятком того, що експеримент проводився з витратою стисненого повітря $0,097 \text{ м}^3/\text{год}$. Для виключення грубих помилок для кожної конструкції донного продувного блоку експеримент повторювався тричі. А про вплив

конструкції продувного блока на час гомогенізації розплаву судили по середньому значенню в кожній серії.

3.2 Результати моделювання з визначення впливу конструктивних параметрів донного продувального блоку сталерозливного ковша на ефективність масообмінних процесів

В процесі проведення експериментів були отримані кількісні результати стосовно впливу характерного розміру прохідного перетину щільного каналу на час гомогенізації. Крім цього була проведена якісна оцінка гідродинамічних особливостей впливу параметрів продувки. Вона проводилась для режиму продувки з витратою стисненого повітря $0,097 \text{ м}^3/\text{год}$. При цьому була отримана динаміка зміна гідродинамічної картини для кожного випадку, що розглядався, протягом 0, 2, 3, 4 та 5 с від початку введення рідини-трасеру. Такий підхід необхідний для можливості співставлення отриманих результатів у всіх серіях експериментів.

Базовим експериментом, що визначав точку відліку для порівняння було прийнято процес гомогенізації рідини без зовнішнього впливу, тільки за рахунок природного масопереносу. Зміни гідродинамічної картини ванни в цьому випадку представлена на рис. 3.6. Відповідно до даних представлених на ньому рідка ванна гомогенізується протягом 85 с. При цьому при введенні рідини-трасеру на початковому етапі вона проникає у верхні шари рідини на глибину 30 – 35 мм від верхнього рівня рідини у моделі й розповсюджується по об'єму рідини (рис. 3.6 б). З плином часу рідина-трасер під дією сили тяжіння спускається до нижньої частини об'єму внутрішнього простору моделі (рис. 3.6 в, г). З плином часу рух рідини-трасеру до нижньої частини моделі викликає утворення контуру циркуляції, що викликає спливання певних об'ємів рідини від донної частини моделі вгору, що викликає розповсюдження рідини-трасеру до верхньої частини моделі. Початок вище зазначеного процесу приведено на рис. 3.6 г.

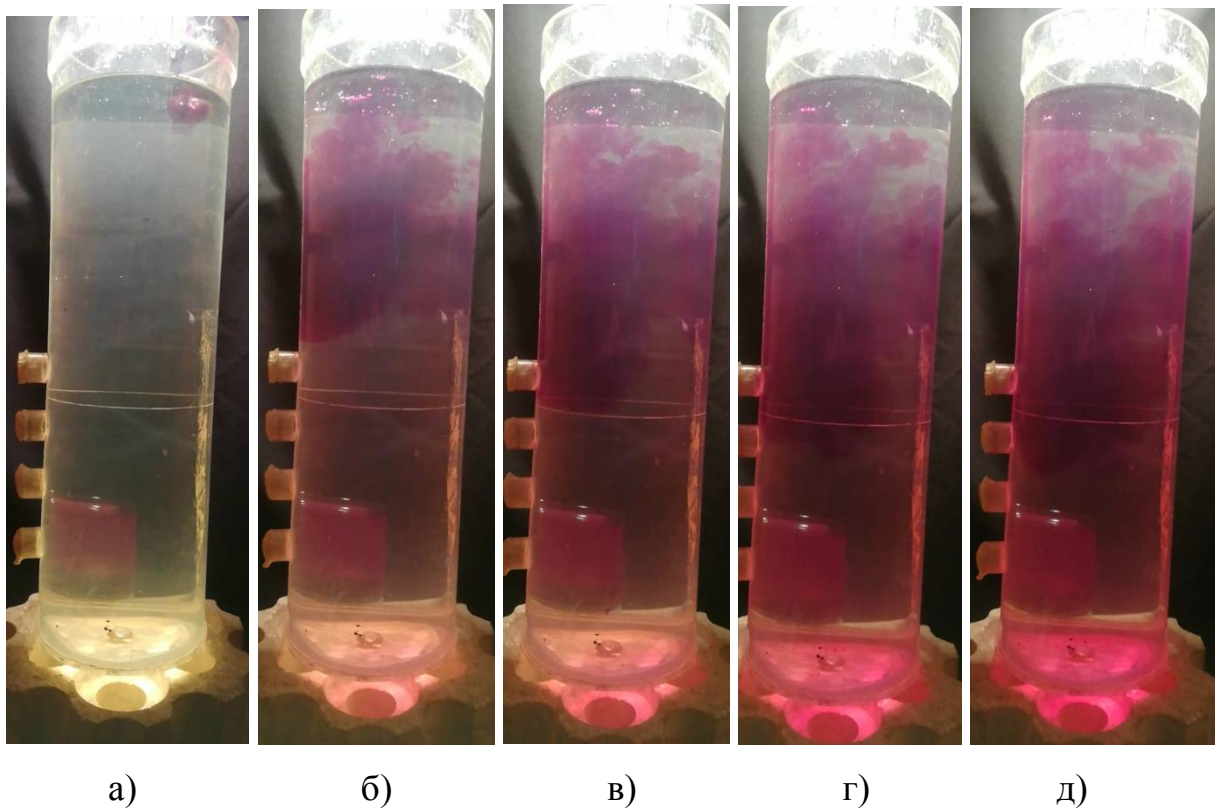
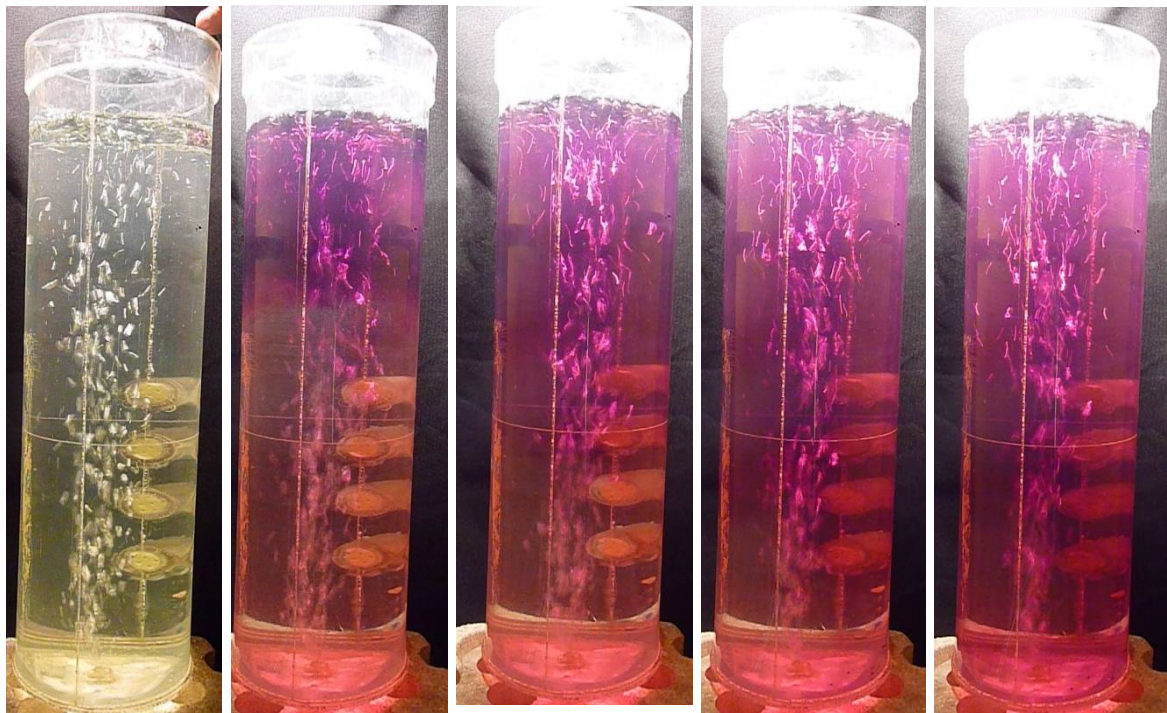


Рисунок 3.6 - Зміна гідродинамічної картини гомогенізації рідкої ванни при відсутності зовнішнього впливу: а – початок введення рідини-трасеру; б – 2 с від початку введення рідини-трасеру; в – 3 с від початку введення рідини-трасеру; г - 4 с від початку введення рідини-трасеру; д - 5 с від початку введення рідини-трасеру

Наступним етапом дослідження було використання щілинної продувної вставки з одиничним отвором шириною 50 мкм. Зміни гідродинамічної картини ванни в цьому випадку представлена на рис. 3.7. Відповідно до даних представлених на ньому гомогенізація рідкої ванни відбувається протягом 14 с. Введення рідини-трасеру супроводжується розповсюдженням по всьому об'єму верхньої частини моделі (рис. 3.7 б). Це викликана поєднанням дії сили тяжіння, що викликає рух рідини-трасеру в нижню частину, та підйомної сили бульб стисненого повітря, що викликають рух рідини в середині моделі до гори.



а) б) в) г) д)

Рисунок 3.7 - Зміна гідродинамічної картини гомогенізації рідкої ванни при здійсненні продувки ванни через щілинну вставку з одиничним отвором шириною 50 мкм: а – початок введення рідини-трасеру; б – 2 с від початку введення рідини-трасеру; в – 3 с від початку введення рідини-трасеру; г - 4 с від початку введення рідини-трасеру; д - 5 с від початку введення рідини-трасеру

Враховуючи малий перетин пропускного каналу вставки потужність перемішування незначна, що відображається в існуванні фронту розповсюдження рідини-трасеру, який переміщується зверху вниз (рис. 3.7 в-д).

Зміни гідродинамічної картини ванни при використанні щілинної продувної вставки з одиничним отвором шириною 100 мкм представлена на рис. 3.8. Загальний час гомогенізації рідини в цьому випадку складає 7с. Введення рідини-трасеру супроводжується утворенням у верхній частині моделі інтенсивно підфарбованої ділянки, від якої спостерігається від'ємний градієнт до донної частини моделі (рис. 3.8 б). З плином часу інтенсивність

існуючого градієнту зменшується через гомогенізацію рідини у моделі (рис. 3.8 в-д).

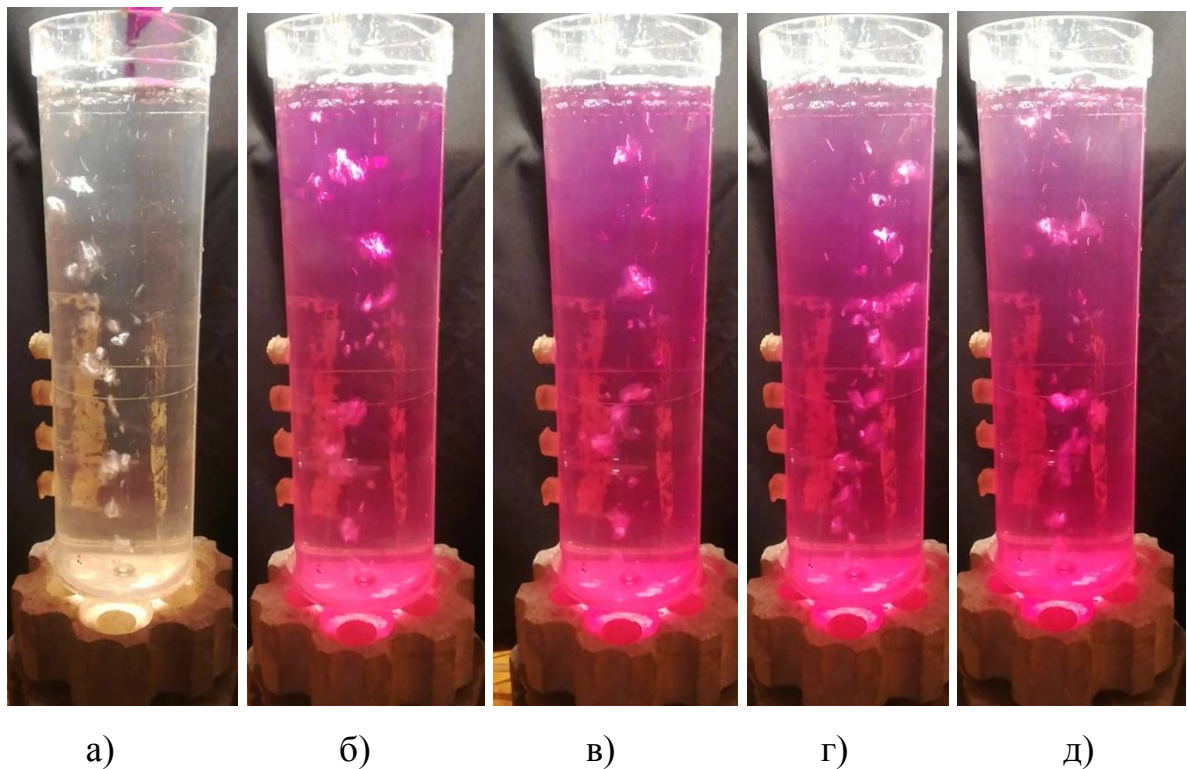


Рисунок 3.8 - Зміна гідродинамічної картини гомогенізації рідкої ванни при здійсненні продувки ванни через щілинну вставку з одиничним отвором шириною 100 мкм: а – початок введення рідини-трасеру; б – 2 с від початку введення рідини-трасеру; в – 3 с від початку введення рідини-трасеру; г - 4 с від початку введення рідини-трасеру; д - 5 с від початку введення рідини-трасеру

Такий розвиток подій викликано збільшенням інтенсивності перемішування рідини бульбашками стисненого повітря. При цьому в середині моделі формується чіткий замкнений контур перемішування.

Динаміка гідродинамічної картини в часі при використанні щілинної продувної вставки з одиничним отвором шириною 500 мкм. представлена на рис. 3.9.



а)

б)

в)

г)

д)

Рисунок 3.9 - Зміна гідродинамічної картини гомогенізації рідкої ванни при здійсненні продувки ванни через щілинну вставку з одиничним отвором шириною 500 мкм: а – початок введення рідини-трасеру; б – 2 с від початку введення рідини-трасеру; в – 3 с від початку введення рідини-трасеру; г - 4 с від початку введення рідини-трасеру; д - 5 с від початку введення рідини-трасеру

Загальний час гомогенізації рідини в цьому випадку складає 6с. Процес введення рідини-трасеру супроводжується утворенням у верхній частині моделі інтенсивно підфарбованої ділянки, від якої спостерігається від'ємний градієнт до донної частини моделі (рис. 3.9 б). З плином часу інтенсивність існуючого градієнту зменшується через значну швидкість гомогенізації рідини у моделі (рис. 3.9 в-д). За рахунок збільшення розміру бульбашок стисненого повітря значно зростає інтенсивність перемішування рідини, в середині моделі формується чіткий замкнений контур перемішування.

Зміна гідродинамічної картини в часі при використанні щілинної продувної вставки з одиничним отвором шириною 8000 мкм. представлена на рис.3.10.

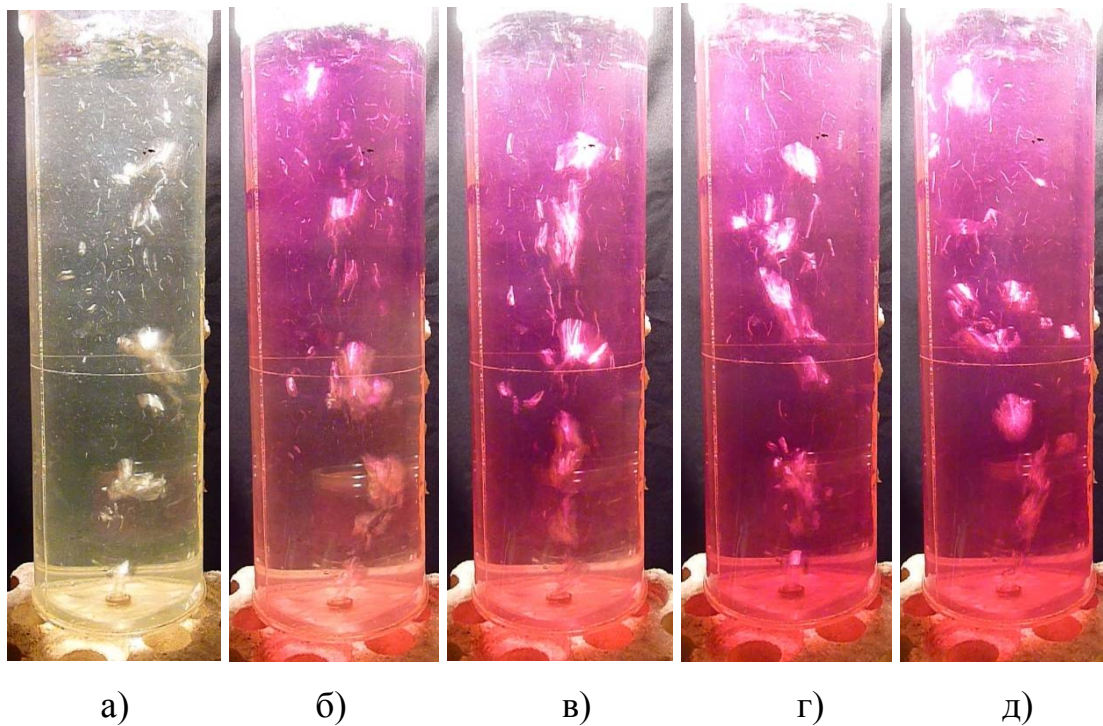


Рисунок 3.10 - Зміна гідродинамічної картини гомогенізації рідкої ванни при здійсненні продувки ванни через щілинну вставку з одиничним отвором шириною 8000 мкм: а – початок введення рідини-трасеру; б – 2 с від початку введення рідини-трасеру; в – 3 с від початку введення рідини-трасеру; г - 4 с від початку введення рідини-трасеру; д - 5 с від початку введення рідини-трасеру

Час гомогенізації рідини в цьому випадку складає 5с. Як і в попередньому випадку введення рідини-трасеру супроводжується утворенням у верхній частині моделі інтенсивно підфарбованої ділянки, від якої спостерігається від'ємний градієнт до донної частини моделі (рис. 3.10 б). Протягом здійснення продувки рідини стисненим повітрям інтенсивність існуючого градієнту зменшується через високу швидкість перемішування рідини у моделі (рис. 3.9 в,г). По досягненню часу 5 с спостерігається повна гомогенізація рідини за інтенсивністю кольору.

Таким чином, якісно встановлено, що збільшення розміру каналу для введення стисненого повітря у рідину приводить до значного збільшення інтенсивності перемішування через збільшення діаметру бульбашок, що

утворюються. Загальні результати експериментів з визначення впливу характерного розміру щілинної донної вставки на час гомогенізації представлені у таблиці 3.2 та на рис. 3.11

Таблиця 3.2 – Результати експерименту з визначення впливу характерного розміру щілинної донної вставки з одиничним отвором на час гомогенізації

Об'ємна витрата повітря q			d_c , мм	τ , с
%	м ³ /ч	м ³ /с		
24	0,1512	$4,20 \cdot 10^{-5}$	0,05	10
15	0,0945	$2,63 \cdot 10^{-5}$	0,05	14
5	0,0315	$8,75 \cdot 10^{-6}$	0,05	17
24	0,1512	$4,20 \cdot 10^{-5}$	0,1	5
15	0,0945	$2,63 \cdot 10^{-5}$	0,1	7
5	0,0315	$8,75 \cdot 10^{-6}$	0,1	10
24	0,1512	$4,20 \cdot 10^{-5}$	0,5	5
15	0,0945	$2,63 \cdot 10^{-5}$	0,5	6
5	0,0315	$8,75 \cdot 10^{-6}$	0,5	7
24	0,1512	$4,20 \cdot 10^{-5}$	8	5
15	0,0945	$2,63 \cdot 10^{-5}$	8	5
5	0,0315	$8,75 \cdot 10^{-6}$	8	7
0	0	0	-	85

З таблиці та рисунка видно, що середній час гомогенізації зменшується зі збільшенням характерного розміру щілини та збільшенням витрати повітря. Отримані результати були оброблені за методикою автотомельності безрозмірного критерію, відповідно до якого встановлено, що похідна логарифма критерію гомохронності дорівнює нулю при $\lg D > -2,7$ ($D > 2 \cdot 10^{-3}$). Це значить, що подібність процесу розчинення виконується за умови, що характерний розмір прохідного перетину каналу повздовжньої вставки

більше 1 мм за умов проведення низькотемпературного моделювання на воді з використанням у якості газу стисненого повітря.

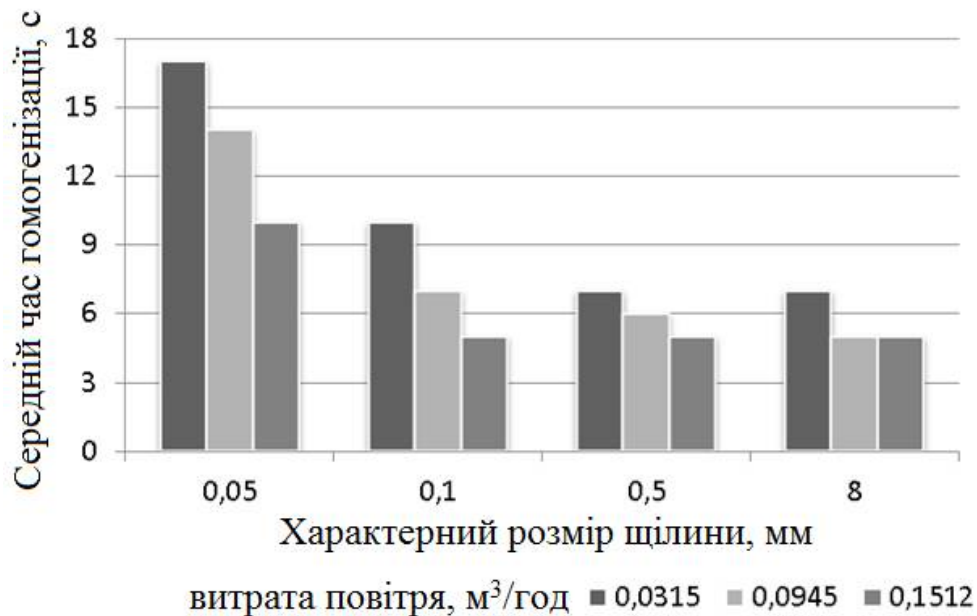


Рисунок 3.11 - Порівняння результатів дослідів із різними витратою повітря і шириною отвору [115]

Цих умов достатньо при проведенні фізичного моделювання в масштабі 1:10 (0,28 мм) до оригіналу.

На наступному етапі досліджень проводилося визначення впливу виду бульбашко утворювача на донному продувальному блоці на швидкість гомогенізації ванни при цьому якісно оцінювалася гідродинамічна картина, кількісно час гомогенізації.

Гідродинамічна картина використання каналного бульбашкоутворювача оснащеного 4 циліндричними каналами діаметром 1 мм приведено на рис. 3.12. Повний час гомогенізації в цьому випадку склав 7 с. В процесі виходу бульбашок з каналів бульбашкоутворювача вони зливалися та укрупнювалися за рахунок чого не забезпечувалося рівномірне перемішування рідини у моделі (рис. 3.12, а). В процесі здійснення експерименту канал виходу бульбашок з ванни був нестабільним та періодично переміщувався в об'ємі рідини відносно вертикальної та

горизонтальної вісей моделі (рис. 3.12, б-д). Гідродинамічні особливості застосування щілинного бульбашкоутворювача оснащеного 4 каналами шириною 1 мм представлено на рис. 3.13.

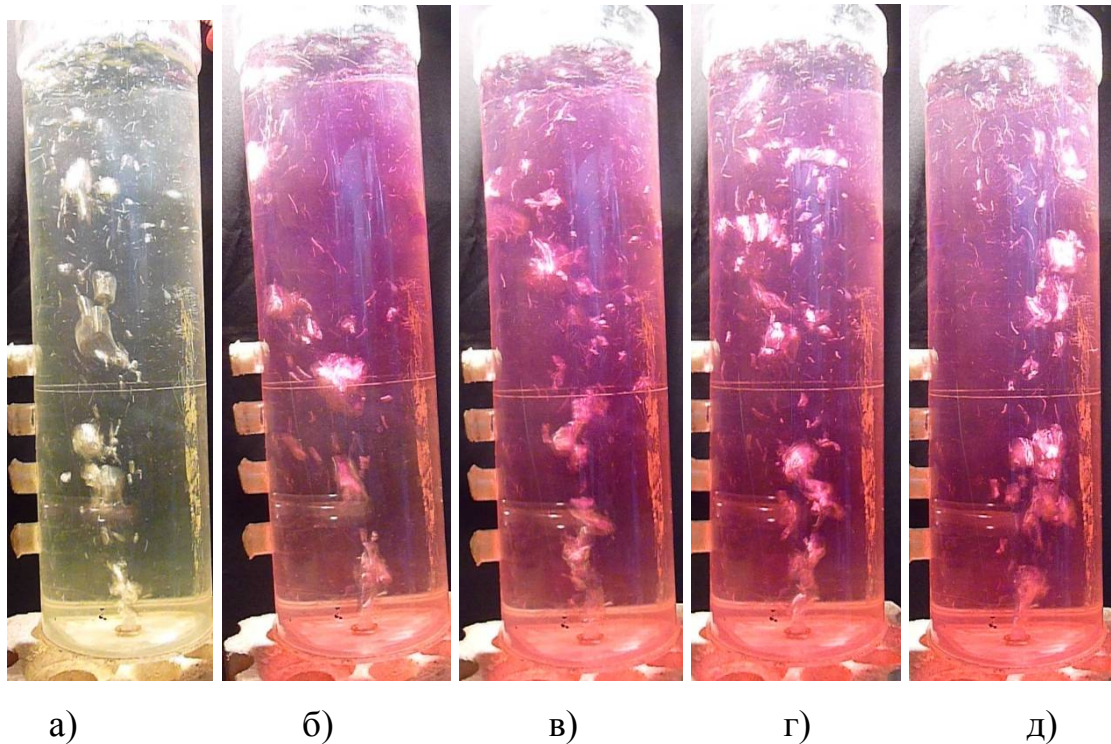


Рисунок 3.12 - Зміна гідродинамічної картини гомогенізації рідкої ванни при використанні каналного бульбашкоутворювача: а – початок введення рідини-трасеру; б – 2 с; в – 3 с; г - 4 с; д - 5 с [116]

Повний час гомогенізації, як і в попередньому випадку, склав 7 с. При виході бульбашок з щілинних каналів бульбашкоутворювача не відбувається процесів злиття та укрупнення (рис. 3.13, а). При цьому в процесі здійснення експерименту канал виходу бульбашок з ванни був нестабільним та періодично переміщувався в об'ємі рідини відносно вертикальної та горизонтальної вісей моделі (рис. 3.13, б-д).

Гідродинамічні особливості застосування бульбашкоутворювача з ненаправленою пористістю представлено на рис. 3.14.

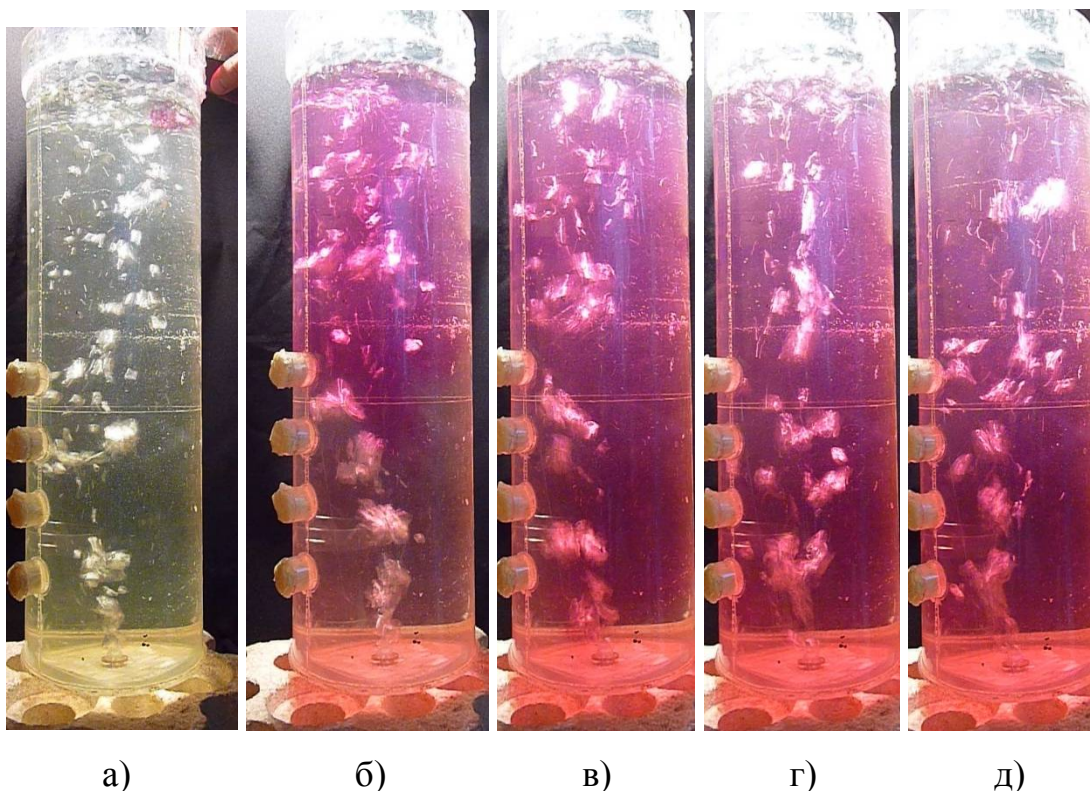


Рисунок 3.13 - Зміна гідродинамічної картини гомогенізації рідкої ванни при використанні щільного бульбашкоутворювача: а – початок введення рідини-трасеру; б – 2 с; в – 3 с; г - 4 с; д - 5 с [114]

Повний час гомогенізації склав 6 с. При виході бульбашок з пор бульбашкоутворювача не відбувається процесів злиття та укрупнення (рис. 3.14, а). При цьому в процесі здійснення експерименту канал виходу бульбашок з ванни був стабільним і не переміщувався протягом всього експерименту (рис. 3.14, б-д). Використання бульбашкоутворювача з ненаправленою пористістю дозволяє отримати стабільні за розміром бульбу, що не змінюють напрямку руху в процесі спливання. Таким чином необхідно відзначити, що у кількісній оцінці використання бульбашкоутворювача з ненаправленою пористістю дозволяє знизити час гомогенізації на 1 с, що складає близько 14 %.

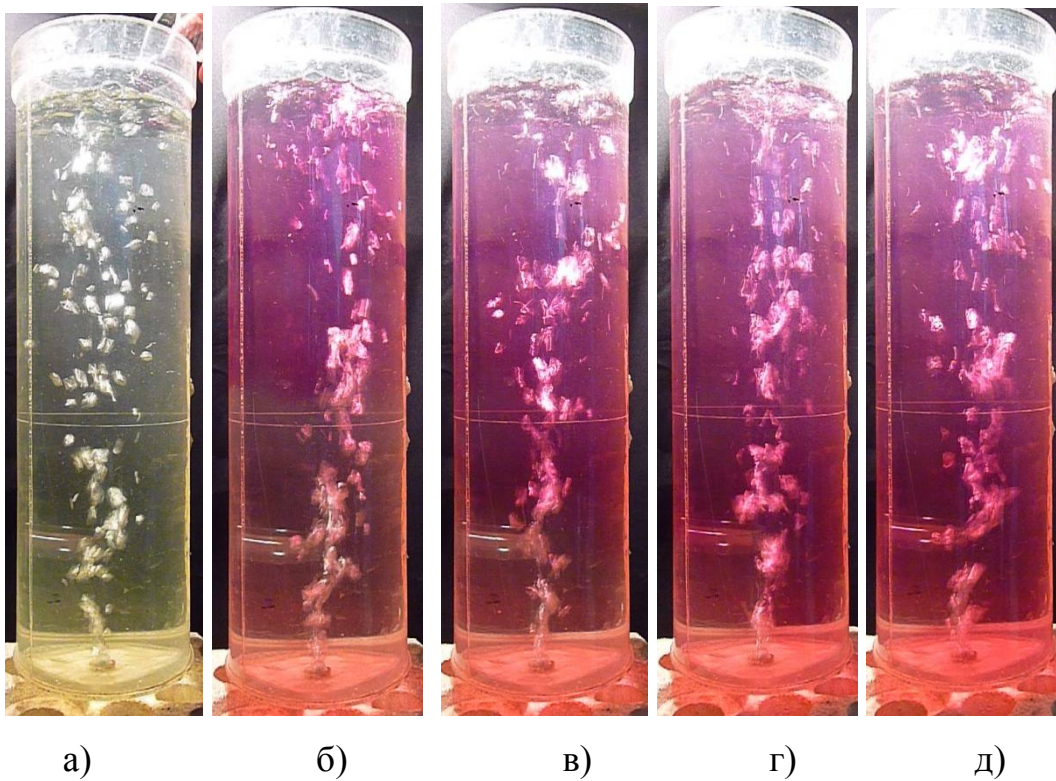


Рисунок 3.14 - Зміна гідродинамічної картини гомогенізації рідкої ванни при використанні бульбашкоутворювача з ненаправленою пористістю: а – початок введення рідини-трасеру; б – 2 с; в – 3 с; г - 4 с; д - 5 с [116]

Відповідно до співставлення отриманих матеріалів досліджень, що до впливу конструктивних особливостей бульбашкоутворювача продувного блоку, було встановлено, що найкращі результати з усереднення хімічного складу рідкого металу в ковші демонструють продувні пристрої з неорієнтованою пористістю (рис. 3.15). При цьому слід відмітити, що використання щілинних бульбашко утворювачів дозволяє досягти трохи менших швидкостей гомогенізації ванни при більшій їх стійкості.

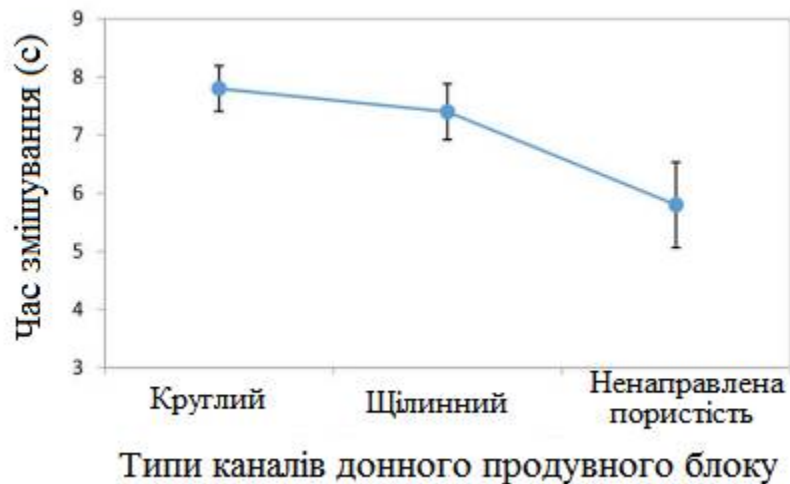
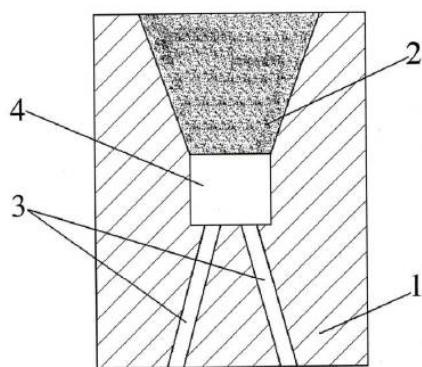


Рисунок 3.15 - Порівняння часу перемішування при використанні пористих пристроїв різної конструкції [116]

3.3 Вдосконалення конструкції донного продувального блоку для умов продувки сумішшю двох газів

На наступному етапі було проведено вдосконалення конструкції донного продувального блоку, який би відповідав раціональному варіанту продувки сумішшю газів: кисню та нейтрального газу, ескіз якого представлений на рисунку 3.16 [117, 118]. Вогнетривкий блок для продувки металу газами працює наступним чином: технологічний газ подається через циліндричні канали, що розташовані у газонепроникній вогнетривкій матриці, до порожнистої камери циліндричної форми. У порожнистій камері циліндричної форми технологічний газ перерозширюється і подається до нижньої основи конічного каналу, який розміщено у газонепроникній вогнетривкій матриці.

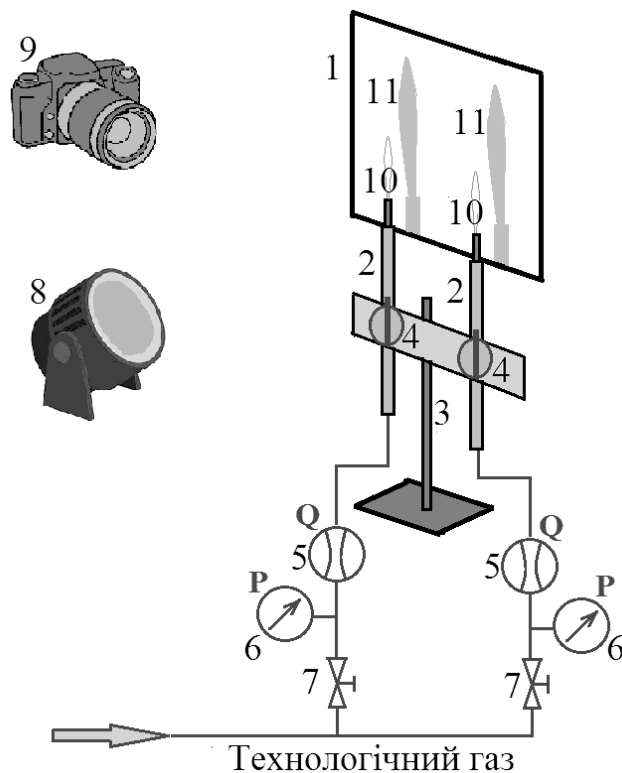


1 – вогнетривкий газонепроникний матеріал; 2 – конічний канал, заповнений газопроникним вогнетривким матеріалом; 3 – циліндричні канали для підведення технологічних газів; 4 – камера-змішувач циліндричної форми

Рисунок 3.16 - Вогнетривкий блок для продувки металу газами [117-118]:

За рахунок наявності у конічному каналі вогнетривкого газопроникного матеріалу технологічний газ поділяється на бульбашки, які, надходячи у розплав, інтенсивно перемішують його. Застосування приведенного пристрою повинно забезпечувати ефективне перемішування рідкого металу у сталеплавильних агрегатах.

Дослідження цього етапу роботи базувалось на вивченні геометричних особливостей взаємодії газових струменів, що фіксувалися методом тіньової зйомки. Схема лабораторної установки представлена на рисунку 3.17. Основною установки слугували продувні сопла діаметром 0,5 мм, рухомо закріплені на горизонтальному штативі. Кожне сопло було приєднано через систему регулювання параметрів подачі газу до балону з газом метаном (для можливості якісної візуалізації струменя на тіньовій зйомці за рахунок значної різниці густин газу, що витікає з сопла та навколишнього середовища). Продувку здійснювали з однаковою витратою для кожного з потоків газів.



1 – білий екран, 2 – продувні сопла діаметром 0,5 мм, 3 – штатив, 4 – механізм регулювання кута нахилу продувного сопла відносно вертикальної вісі, 5 – ротаметр, 6 – манометр, 7 – кран, 8 – твердотільний освітлювальний пристрій, 9- відеокамера.

Рисунок 3.17 - Функціональна схема установки для дослідження особливостей взаємодії газових потоків методом тіньової зйомки.

Освітлення моделі здійснювали твердотільним джерелом світла для створення лінійного потоку світла й меншого спаплюження зображення на білому екрані. Завдяки рухомій основі сопла поступово нахиляли під різними однаковими для кожного із сопел кутами до вертикалі й фіксували за допомогою відеокамери результат взаємодії струменів газу, який витікав з них. Були досліджені кути нахилу сопел до вертикальної вісі від 0° (рух потоків на зустріч один одному) до 180° (повністю протилежний рух потоків).

Найбільш характерні результати дослідження представлені на рисунку 3.18.

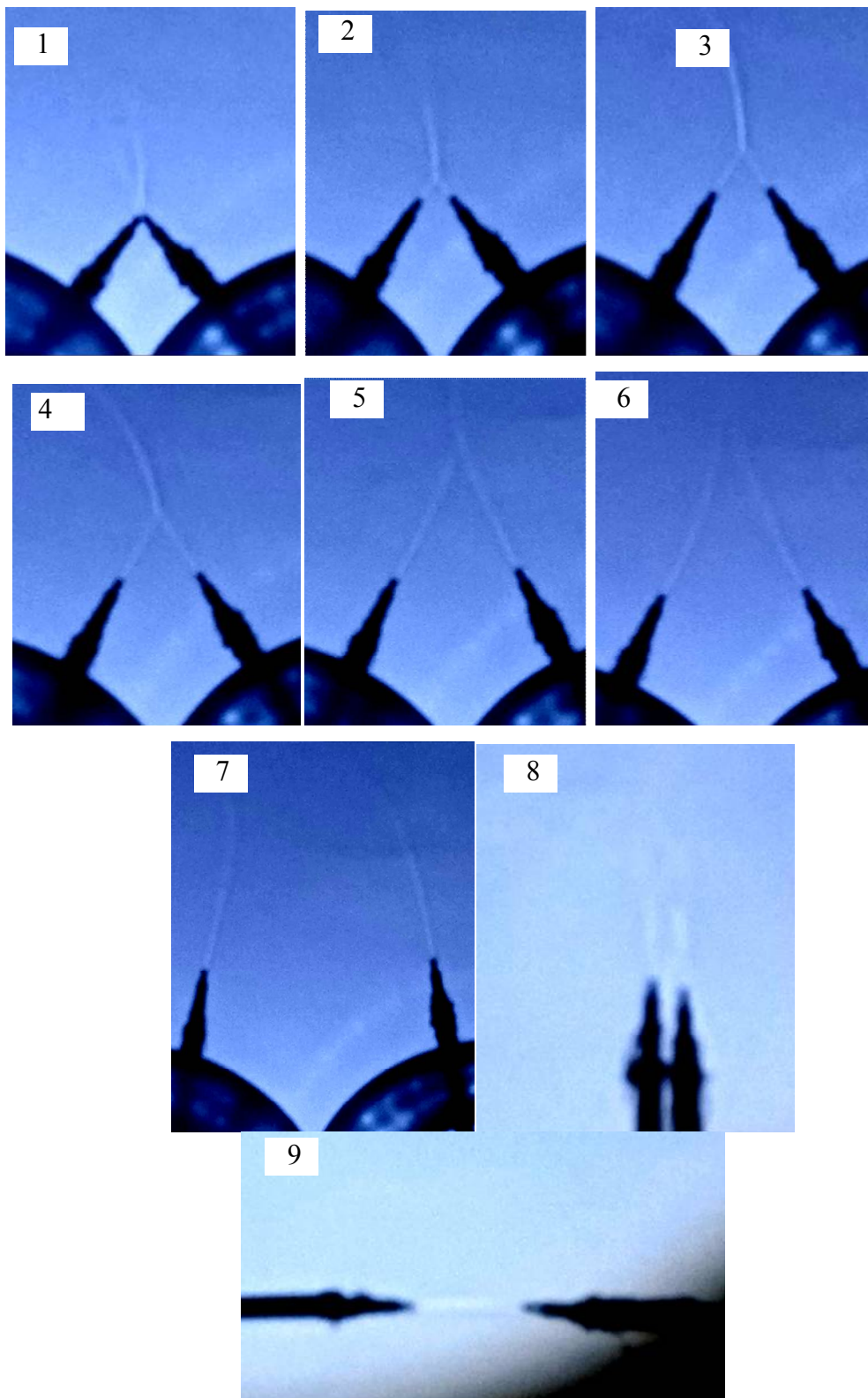


Рисунок 3.18. - Характерні фото дослідження особливостей взаємодії газових струменів при різному куті відхилення сопел від вертикальної вісі: 1 – 45° ; 2 – 40° ; 3 – 35° ; 4 – 30° ; 5 – 25° ; 6 – 20° ; 7 – 15° ; 8 – 0° ; 9 – 90° [9]

Відповідно до даних, встановлено, що струмені, сформовані однаковими початковими умовами (витрата та тиск газу) можуть взаємодіяти шляхом або змішування (рис. 3.18 позиції 1 – 5), або повного взаємного пригнічення (рис. 3.18 позиція 9). При цьому ефективне змішування спостерігається при куті нахилу сопла до вертикальної вісі в проміжку $25 - 40^\circ$ (рис. 3.18, позиції 2 - 5). Таким чином, відповідно до отриманих результатів тіньової зйомки встановлено, що при взаємодії двох струменів із зазначеним кутом нахилу формується результуючий струмінь, який забезпечує повне змішування двох потоків. При зустрічному розташуванні сопел спостерігається повне пригнічення потоків оскільки вони взаємно гальмують один одного. Це призводить до втрати газовими струменями векторів спрямованості та розпорошенню газових струменів у навколишнє середовище. Зазначений режим забезпечує повне змішування двох потоків проте є неприпустимим для умов витікання газових струменів з різною швидкістю (різною витратою та тиском).

Висновки за розділом 3

В ході виконання досліджень на данному етапі встановлені особливості низькотемпературного фізичного моделювання процесу продувки нейтральним газом металевого розплаву через донні продувні блоки різного типу. Відмічено, що найбільш ефективною конструкцією бульбашкоутворювача в складі донного пристрою для продування розплавів є використання матеріалів неорієнтованої пористості або щилинних бульбашко утворювачів з розміром шпарин 1 – 2 мм. Їх використання дозволяє отримати стабільний стовп дрібних бульбашок, за рахунок чого час гомогенізації скорочується.

В ході проведення стендових досліджень встановлено, що для проведення операції зневуглецювання розплаву за рахунок продувки крізь

донні продувні блоки сумішшю технологічних газів у стальковші необхідно в конструкцію донного продувного блоку ввести камеру попереднього змішування технологічних газів. Відповідно до емпірично отриманих результатів канали для ведення різних продувних газів в камеру повинні знаходитися під кутом до вертикальної вісі в межах 25- 40° що забезпечить повне змішування струменів газу з мінімальною втратою швидкості (встановленот за результатами тіньової зйомки за рахунок виявлення геометричних обрисів струменів та відсутності на них ділянок з різною щільністю – відрізняються за інтенсивністю кольора).

Розділ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПЕРЕМІШУВАННЯ РІДКОЇ ВАННИ ПРИ ДОННІЙ БУЛЬБАШКО ВІЙ ПРОДУВЦІ ЗА РІЗНИХ ПАРАМЕТРІВ ДУТТЯ

Активність протікання процесів окислення в розплаві при донному продуванні газовою сумішшю буде інтенсивніша тоді, коли площа поверхні бульбашок та їх кількість буде найбільша, час їх перебування у металі буде довшим, а рух активнішим і складнішим. Площа поверхні бульбашки тим більша, чим менший її розмір, тобто продувку треба здійснювати через досить дрібні пори для створення різноспрямованих бульбашок, кількість яких повинна бути великою для створення великої поверхні контакту. Рух та час перебування бульбашок у об'ємі металу залежить від характеру продувки. Для визначення раціональних режимів продувки крізь донний продувний блок, який має пори, необхідно провести фізичне натурне моделювання.

4.1 Експериментальна установка і методика проведення досліджень щодо встановлення раціональних режимів продувки крізь донний бульбашкоутворювач з ненаправленою пористістю

При вдуванні газу в рідину дуже важливими є процеси, що відбуваються під дією сил тяжіння та сил Архімеда, які впливають як на бульбашки продувного газу, що підіймаються з продувного блоку, так і на потоки, які вже мають у собі розчинений додатковий компонент. Також важливі сили поверхневого натягу, в'язкості та інерції, які визначають розвиток системи циркуляційних потоків у рідкій ванні ковша. Для моделювання процесу продувки металеві ванни були враховані наступні критерії подібності [119 - 121]: число Вебера:

$$We = \frac{\sigma}{\gamma \cdot l^2} = idem, \quad (4.1)$$

де σ - поверхневий натяг, Н/м; γ – питома вага, Н/м³; l – лінійний розмір, м.

число Фруда:

$$Fr = \frac{W^2}{g \cdot l} = idem , \quad (4.2)$$

де W – швидкість руху рідини в моделі, м/с; g – прискорення вільного падіння, м/с².

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{W \cdot l}{\nu} = idem , \quad (4.3)$$

де ν – кінематична в'язкість рідин в системі, м²/с.

Взаємодія сил поверхневого натягу і сил тяжіння зазвичай істотні при повільній течії рідини і вторинних процесах в двофазних системах, що відбувається при бульбашковому режимі продувки з невеликими витратами газу. Інерційні сили струменя та підйомні Архимедови сили враховуються наступним:

число Архімеда:.

$$Ar = \frac{\gamma_{\Gamma} \cdot W_{\Gamma(0)}^2}{g \cdot (\gamma_p - \gamma_{\Gamma}) \cdot d} \approx \frac{\gamma_{\Gamma} \cdot W_{\Gamma(0)}^2}{g \cdot \gamma_p \cdot d} idem , \quad (4.4)$$

де d – діаметр сопла, м.

Узагальнення газо-гідро-динамічної подоби процесів, що відбуваються в моделі та реальному об'єкті, проводить критерій Фруда модифікований:

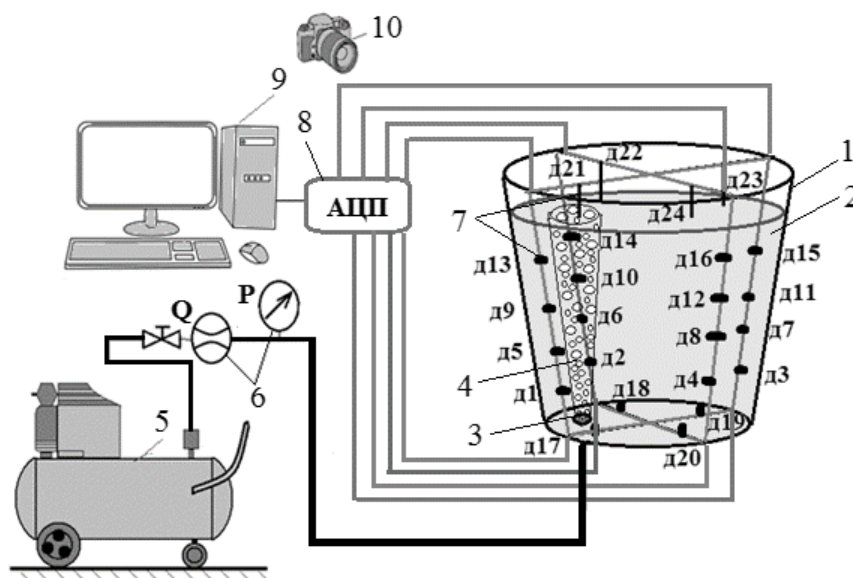
$$Fr' = \frac{u^2}{gD} \times \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_p - \rho_{\Gamma}} \quad (4.5)$$

де u - швидкість витікання газу, м/с; ρ_p , ρ_{Γ} - щільність рідини і газу, кг/м³; D - характерний розмір для моделі та натури, м.

Дослідження щодо встановлення рівномірності перемішування об'єму ванни за умов продування крізь донний продувний блок з ненаправленою пористістю (діаметр пор 0,1 мм, діаметр вставки 12 мм) у бульбашковому режимі було проведено на прозорій фізичній моделі 250-т сталерозливного ковша (у масштабі 1:15) з використанням у якості модельної рідини води з продуванням повітрям та присадками у якості «важкої» присадки солі NaCl за використання електрохімічного методу [122-126]. Вибір води як моделюючої рідини пояснюється тим фактом, що значення в'язкості води і сталі в області температур позапічної обробки досить близькі один до одного. Сіль NaCl із густиною (2160 кг/м^3) у двічі більшою за густину чистої води (1000 кг/м^3) була обрана для додаткової можливості моделювання розповсюдження «важких» легуючих чи модифікуючих присадок типу FeMo чи FeW ($12600\text{-}14000 \text{ кг/м}^3$), які мають густину приблизно у два рази більше за густину сталі (приблизно 7000 кг/м^3). Було обрано для моделювання середньо леговані сталі з вмістом легуючих елементів приблизно 1%. Функціональна схема установки наведена на рис. 4.1. Модельні параметри наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри моделювання

Параметр	Модель	Промисловий сталь ківш
Висота,м	0,319	4,350
Верхній діаметр,м	0,308	4,200
Нижній діаметр,м	0,262	3,570
Тип продувки	Один донний блок	Один донний блок
Густина продувного газу, кг/м^3	1,79	1,7
Густина рідини, кг/м^3	1000	7000



1 - модельна ємність - ківш; 2 - вода, що імітує розплав; 3- донний продувний блок; 4 - пухирці продувного газу - повітря; 5 - повітряний компресор; 6 - система регулювання подачі повітря (витратомір та манометр); 7 - датчики контролю електропровідності; 8- АЦП; 9- ПК; 10 - відеокамера

Рисунок 4.1 - Функціональна схема моделювання

Відповідно до рівності критеріїв Фруда [120, 121] та виходячи з рівняння витрати продувного газу крізь пори продувного блоку витрату продувного газу можна знайти за рівнянням:

$$Q = u \cdot \pi \cdot r^2 \quad (4.6)$$

Відповідно до рівняння (4.6) встановлено, що витрата продувного газу на моделі повинна бути у 2,85 рази більша за витрату продувного газу на реальному промисловому об'єкті. Відповідно по технологічній інструкції усереднювальної продувки 250- т сталевого ковша після введення феросплавів під час випуску металу з плавильного агрегату час продувки становить 5-15 хв, а інтенсивність продувки складає 0,12-0,32 м³/т·год [127]. Досліджено продувку газом з витратою у вказаному промисловому діапазоні й додатково було досліджено продувку з меншою та більшою витратою у перерахунку за (4.6) м³/т·год: 0,171; 0,342; 0,684; 1,026; 1,368 (з другого по

четверте значення витрати відповідають рівню промислової продувки, за середній рівень для співставлення приймемо $0,684 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$). Як критерій ефективності перемішування присадки солі у рідину в ковші був прийнятий показник інтенсивності перемішування, що визначався як час гомогенізації об'єму рідини в ковші за допомогою реєстрації спеціальними електричними датчиками зміни електропровідності рідкого розчину у різних точках ковшу. 24 датчики виготовлені з платинового дроту діаметром 0,5 мм, що знижує вірогідність окислення та підвищує точність вимірювання, та за ізольовані один від одного реєстрували зміну напруги у мВ у часі. Схема розташування датчиків наведена на рис. 4.2.

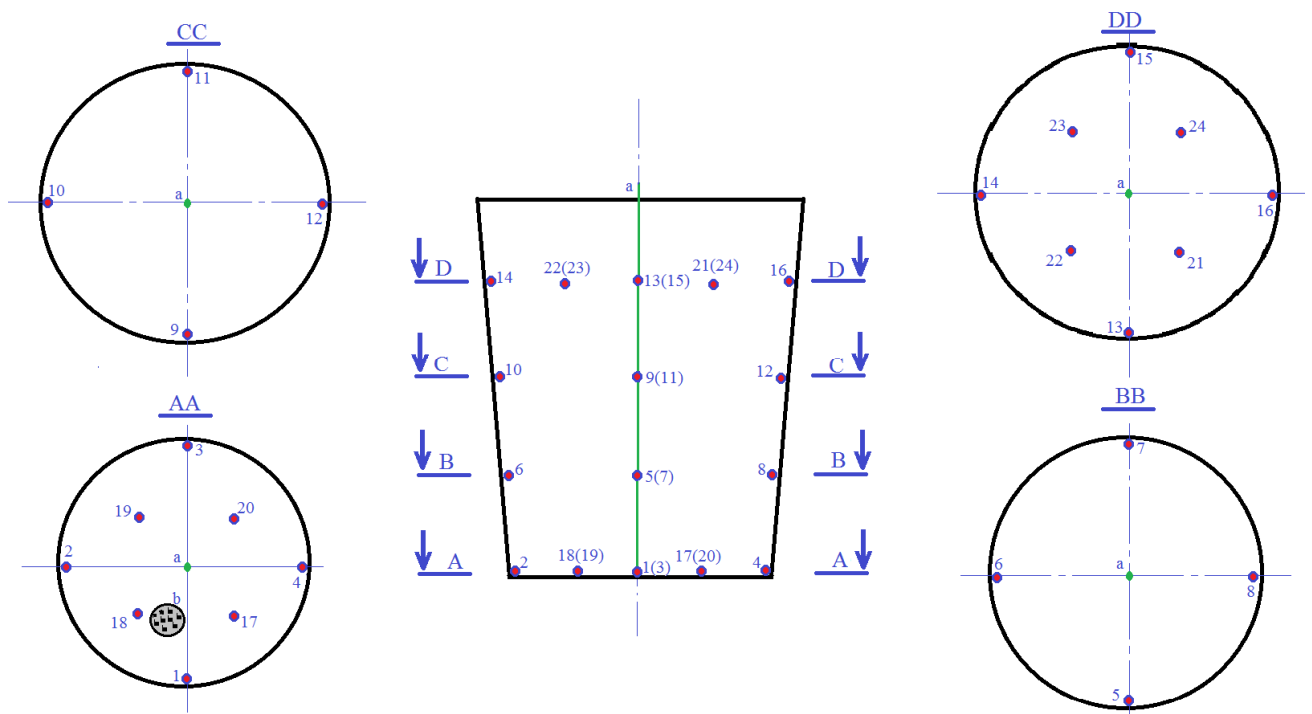


Рисунок 4.2 - Схема розташування вимірювальних датчиків у моделі ковша: 1 -24 датчики реєстратори; а – центральний електрод; b – продувний блок

Зі схеми видно, що вимірювання проводилося за чотирма вертикалями, розташованими по секторах, починаючи від місця дислокації фурми, які утворювали п'ять рівнів зрізів. Також датчики було розміщено на дні ковша

та симетрично до донних закріплено на поверхні рідкої ванни. Зміна показників, що реєструвалася датчиками з частотою 50Гц на персональному комп'ютері за допомогою багатоканального АЦП типу Е-140. Кількість солі, що використовувалася під час експерименту, була розрахована відповідно до умов отримання 1% розчину після повного розчинення у 15 л води і дорівнювала 176,5 г.

Продувку починали через 2 хвилини після введення через верх ковшу одразу всієї порції розчинної добавки. Цей час необхідний для стабілізації показників датчиків після вимушених хвилювань, спричинених імпульсом падіння солі. Витрату продувного газу вимірювали ротаметром РМ-0,063Г. Загальний час з моменту введення солі до закінчення продувки складав 12 хвилин і був однаковим для всіх варіантів продувки (час продувки складав 10 хвилин).

Для якісної та кількісної оцінки перемішування у часі та підтвердження моменту досягнення 1% розчину використовували оптичний прилад вимірювання концентрації солі у розчині – оптичний рефрактометр RZ 112. Вимірювання проводили кожні 2 хвилини з моменту введення солі і протягом продувки шляхом забору проби на поверхні ковшу та на половинній глибині кожного разу у однаковій точці.

Додатково проводили відео- та фотофіксацію процесу продувки.

Отримані за ходом продувки данні були переобчислені на електропровідність (G , См) за формулою [127]:

$$G = \frac{1}{\left(\frac{U_{\text{живл}}}{U_{\text{датч}}} - 1\right) \cdot 10^3}, \quad (4.7)$$

де $U_{\text{живл}}$ – напруга на джерелі живлення, складає 12 В, $U_{\text{датч}}$ – напруга на кожному датчику у конкретний час, В.

4.2 Результати досліджень щодо встановлення раціональних режимів продувки крізь донний бульбашкоутворювач з ненаправленою пористістю

Результати виміру зміни концентрації солі у розчині за ходом дослідів наведені на рисунках 4.3 та 4.4 для поверхні та об'єму ковшу (на половині глибини). З рисунків видно, що концентрація солі в об'ємі розчину та на поверхні дещо різниться й за 10 хвилин продувки досягти 1% розчину вдалося тільки за умов подачі газу з витратою 30 та 40%. Найменшу концентрацію солі на час продувки отримано при витраті 5% - 0,7%мас. Також встановлено, що найбільш активно розповсюдження солі в об'ємі розчину відбувалося при витраті газу 30%, а найгірше перемішування солі відбувалося при витраті 5-10%.

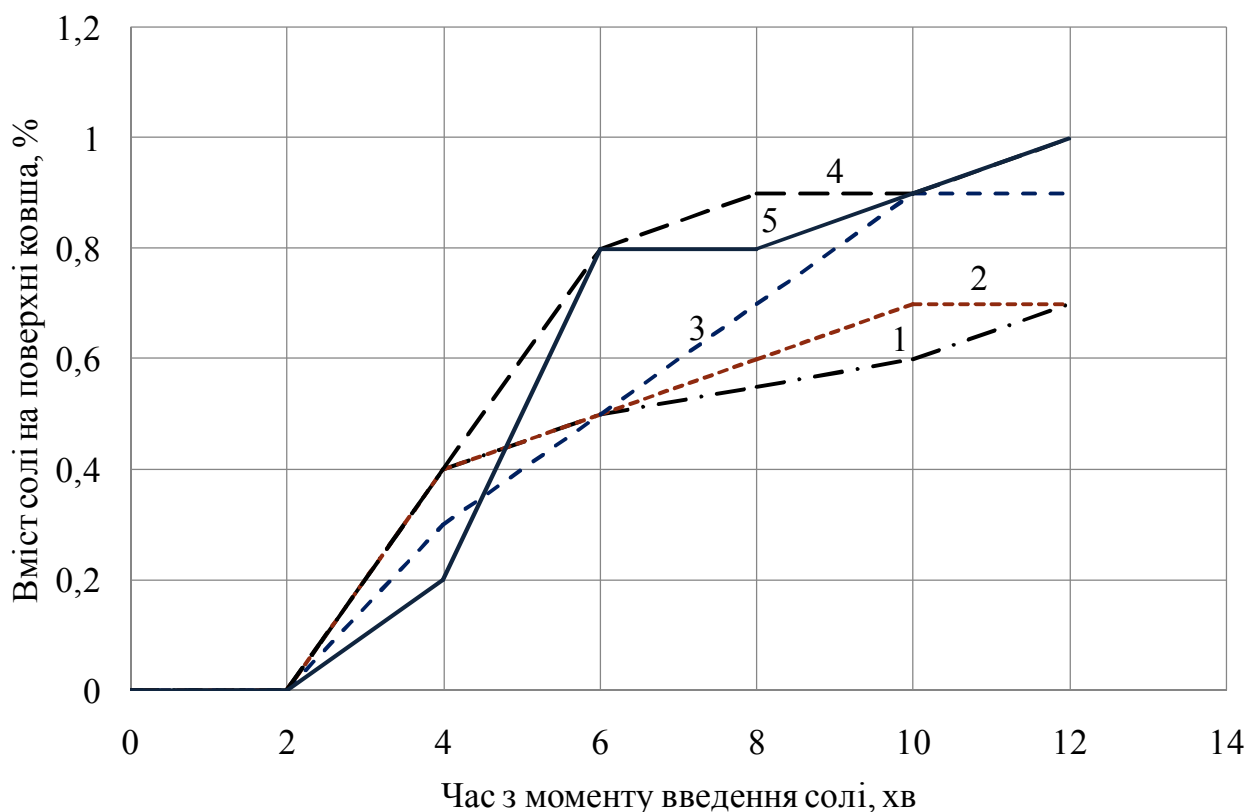


Рисунок 4.3 - Зміна концентрації солі на поверхні розчину за час продувки при різних витратах продувального газу (витрати продувального газу: 1- 0,171; 2- 0,342; 3- 0,684; 4- 1,026; 5-1,368 м³/т·год)

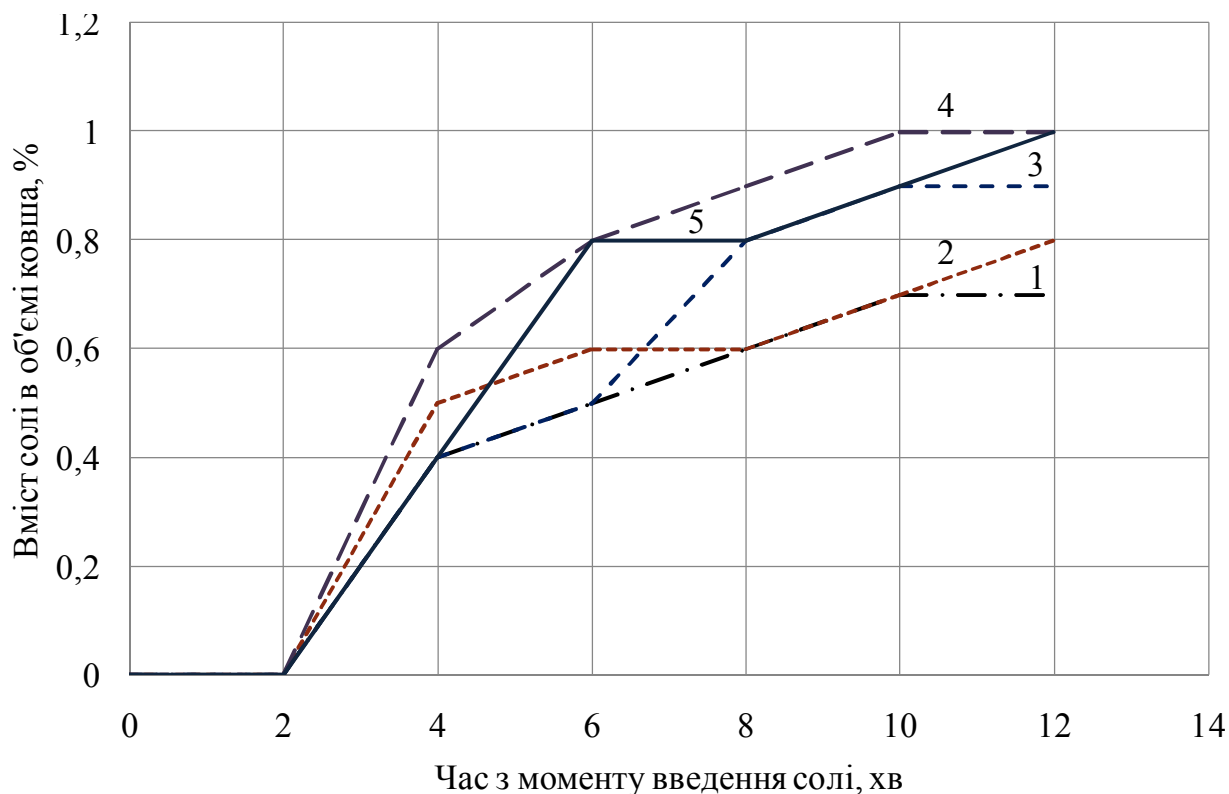


Рисунок 4.4 - Зміна концентрації солі у розчині за час продувки при різних витратах продувального газу (витрати продувального газу: 1- 0,171; 2- 0,342; 3- 0,684; 4- 1,026; 5-1,368 м³/т·год)

Для пояснення причин отриманих результатів проаналізуємо показники датчиків за час продувки за різними витратами, а саме приріст показнику по горизонтальних рівнях: датчики 1-4 рівень «А_А» (наближений до днища ковшу), датчики 5-8 рівень «В_В» (другий від днища), датчики 9-12 – рівень «С_С» (третій рівень від днища), датчики 13-16 – рівень «D_D» (перший від верху ковшу, четвертий рівень від днища), датчики 21-24 – верх ковшу та датчики 17-20 – дно ковша. На рисунках 4.5 - 4.10 наведено зміну електропровідності розчину за час продування при різних витратах газу.

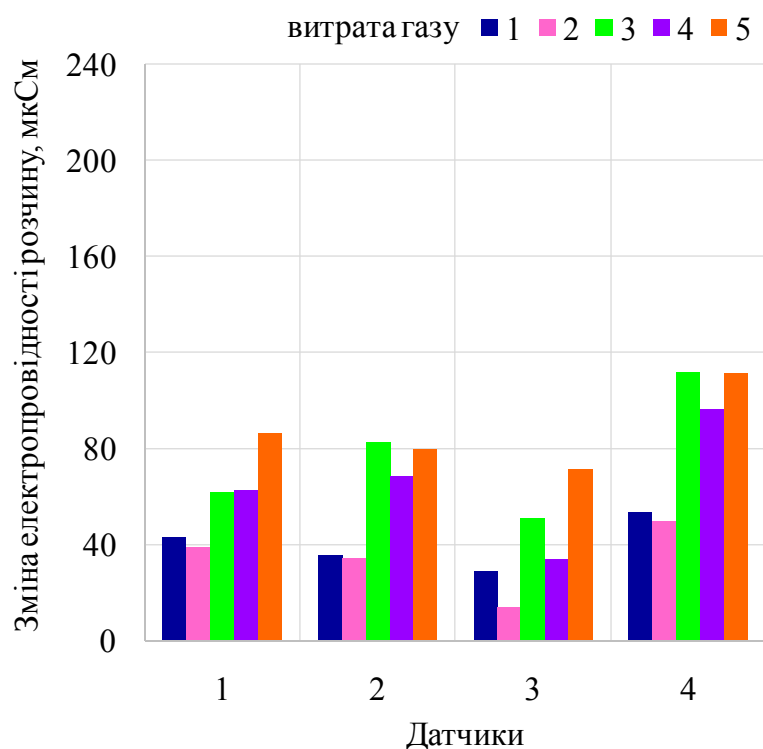


Рисунок 4.5 - Зміна електропровідності за час продування на рівні «А_А» при різних витратах газу (витрати продувального газу: 1- 0,171; 2- 0,342; 3- 0,684; 4- 1,026; 5-1,368 м³/т·год)

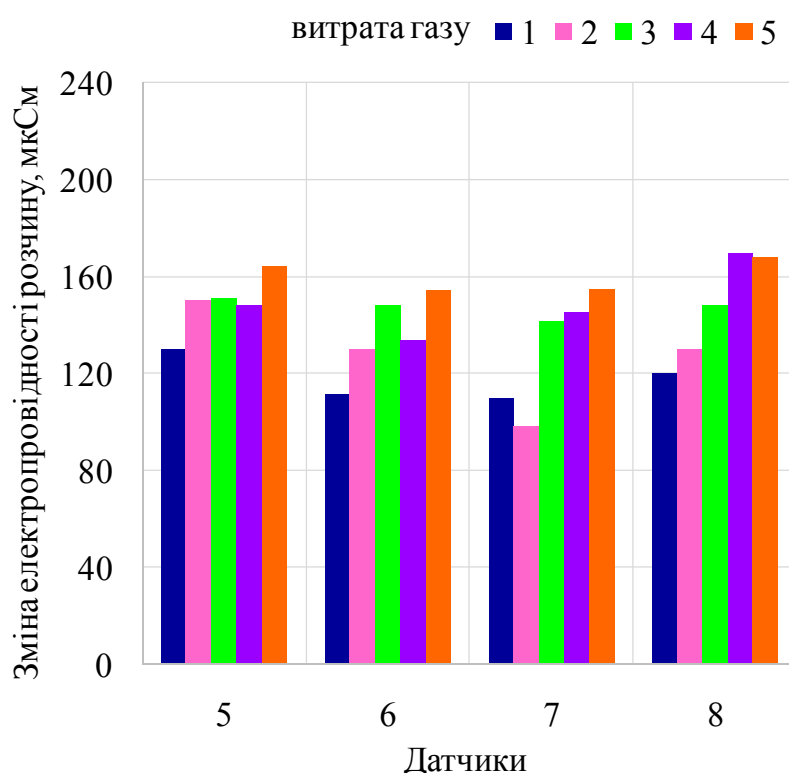


Рисунок 4.6 - Зміна електропровідності за час продування на рівні «В_В» при різних витратах газу (витрати продувального газу: 1- 0,171; 2- 0,342; 3- 0,684; 4- 1,026; 5-1,368 м³/т·год)

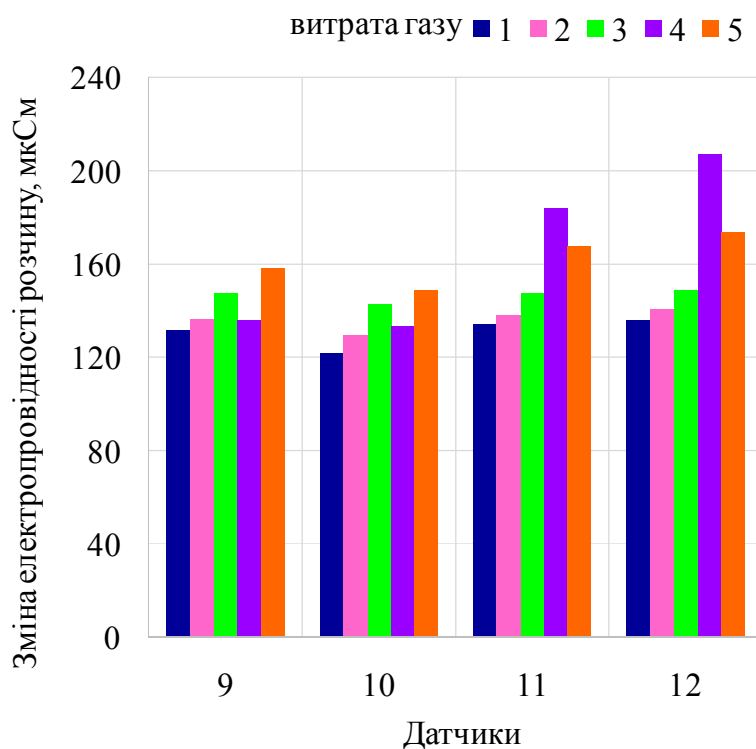


Рисунок 4.7 - Зміна електропровідності за час продування на рівні «С_С» при різних витратах газу (витрати продувального газу: 1- 0,171; 2- 0,342; 3- 0,684; 4- 1,026; 5-1,368 м³/т·год)

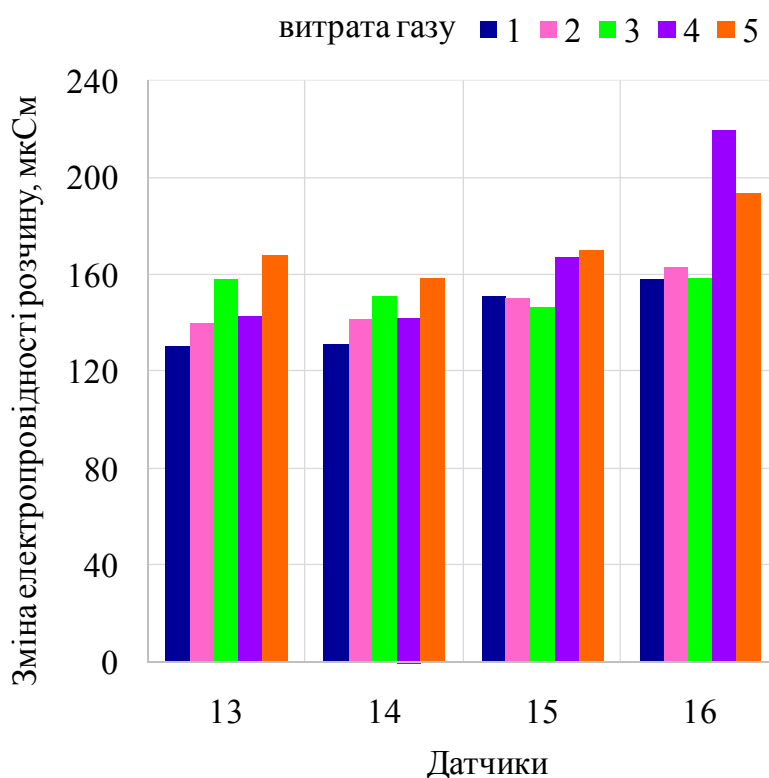


Рисунок 4.8 - Зміна електропровідності за час продування на рівні «D_D» при різних витратах газу (витрати продувального газу: 1- 0,171; 2- 0,342; 3- 0,684; 4- 1,026; 5-1,368 м³/т·год)

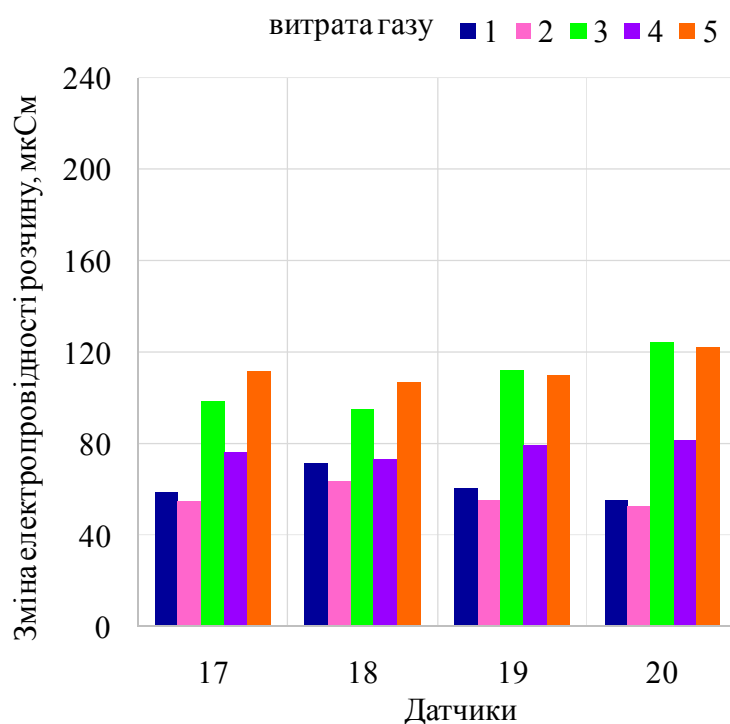


Рисунок 4.9 - Зміна електропровідності за час продування на дні ковшу при різних витратах газу (витрати продувального газу: 1- 0,171; 2- 0,342; 3- 0,684; 4- 1,026; 5-1,368 м³/т·год)

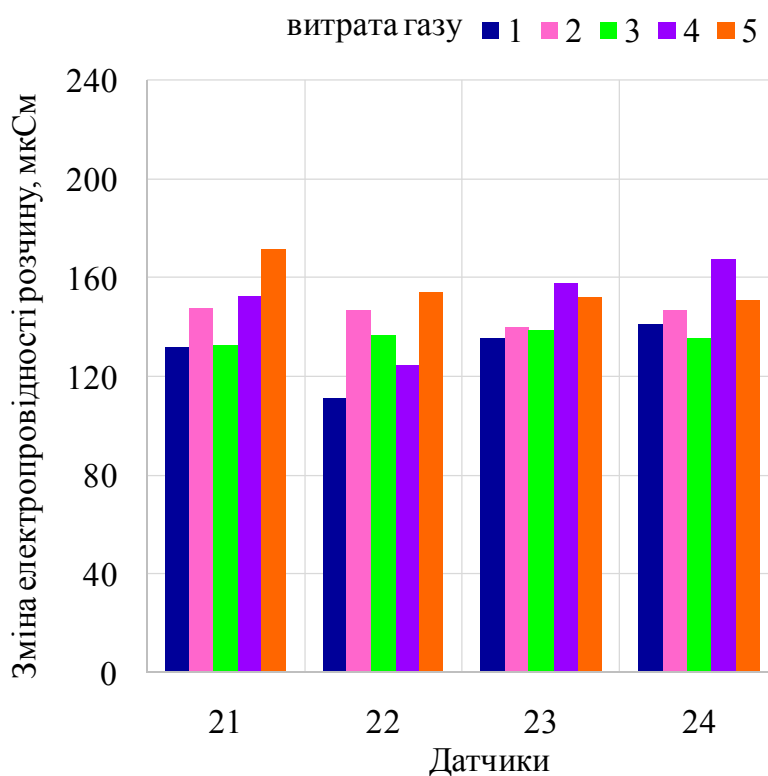
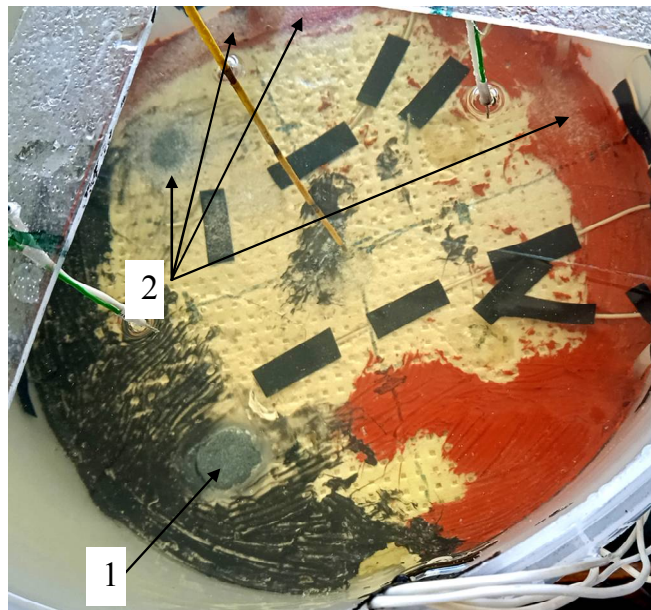


Рисунок 4.10 - Зміна електропровідності за час продування на верхній межі ковшу при різних витратах газу (витрати продувального газу: 1- 0,171; 2- 0,342; 3- 0,684; 4- 1,026; 5-1,368 м³/т·год)

Сіль потрапляє у ківш з водою і під дією сили тяжіння осідає на дно. Під час падіння крізь воду сіль частково розчиняється, проте дуже мало. Основне місце її розчинення – дно й звідти під дією перемішуючих потоків сіль потрапляє у інші шари за висотою ковшу. Слід відмітити, що чим більше розчиняється сіль у воді, тим вище електропровідність розчину. З рисунків можна зробити висновок, що за рівнем зміни електропровідності розчину найбільші зміни за час продувки відбуваються в середині й ближче до верхньої частини об'єму ковша на рівні перетинів «В_В» - «D_D» та й до датчиків, що розміщені на поверхні з досягненням показників приросту електропровідності розчину 120 – 160 мкСм. Це у 2 – 3 рази більше ніж на нижньому перетині об'єму ковша «А_А» та на рівні днища. У зоні днища ковша та нижньому рівні зміна електропровідності за час продувки значно нижча, з величиною показників на рівні 40 – 80 мкСм. Це свідчить про різну інтенсивність потоків, які формуються та розповсюджуються на рівнях: тобто в середині ковша створюються активніші циркуляційні потоки, які активно перерозподіляють сіль, що розчиняється. Це проявляється у високих рівнях зміни показника електропровідності. В доній частині потоки не дуже сильні, бо продувка відбувається у бульбашковому режимі без створення значних турбулентних потоків, через один пористий блок й утворений при цьому потік не може значно впливати на зміну концентрації солі у зазначеній ділянці ванни ковша. Підтвердженням цьому є фото, зроблені після продувки, на яких при невеликих витратах продувного газу (на прикладі рис. 4.11 при продувці з витратою $0,171 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$) видно залишки солі, що розміщені на поверхні, віддаленій від продувного блоку ближче до стінки моделі. Тому зміна електропровідності на цьому рівні досить низька. На нижньому рівні ківшу «А_А» за час продувки найбільша зміна електропровідності відбувається при витратах продувного газу більше $0,684 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ з кращими результатами при високих витратах на рівні $1,368 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ (які вірогідно можуть створювати зворотні турбулентні потоки за рахунок руху бульбашок, що утворюють загальний потік).



1 – продувний блок; 2 – залишки солі

Рисунок 4.11 - Фото днища моделі після продувки з витратою газу $0,171 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$

Додатково були проаналізовані відео, зроблені під час продувки з різними витратами, результати яких наведено на фото рисунки 4.12 - 4.16 та у таблиці 4.2 (фото спеціально затемнені, щоб виділити та чіткіше показати рух бульбашкового потоку).



Рисунок 4.12 - Фото продувки крізь донний блок при витраті продувного газу $0,171 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ [128, 129]

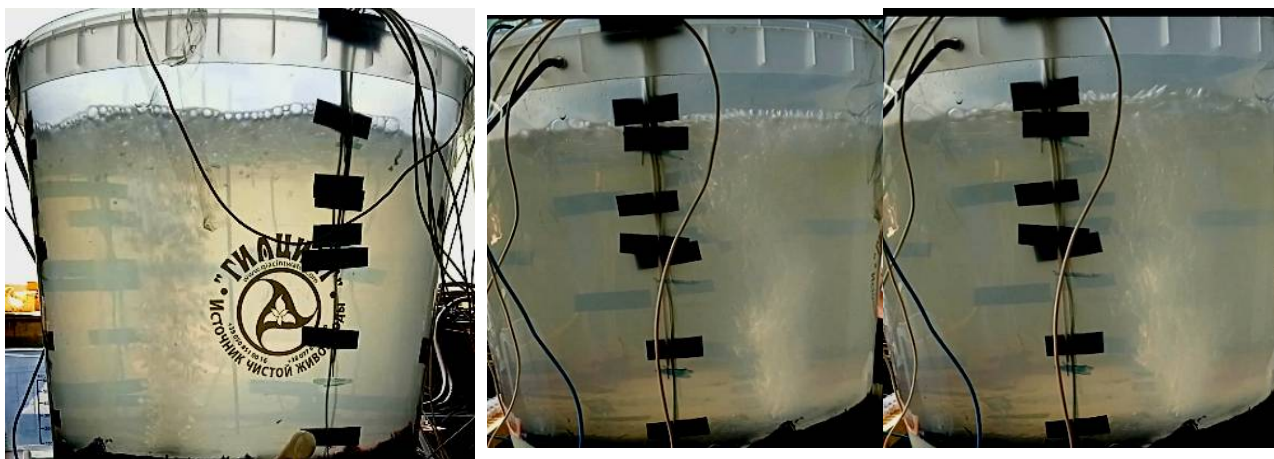


Рисунок 4.13 - Фото продувки крізь донний блок при витраті продувного газу $0,342 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ [128, 129]



Рисунок 4.14 - Фото продувки крізь донний блок при витраті продувного газу $0,684 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ [128, 129]

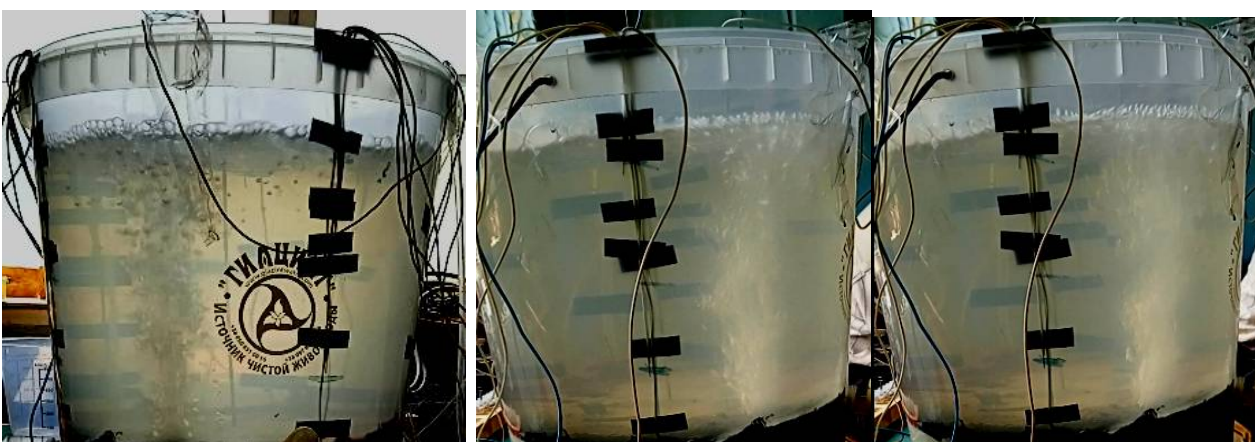


Рисунок 4.15 - Фото продувки крізь донний блок при витраті продувного газу $1,026 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ [128, 129]

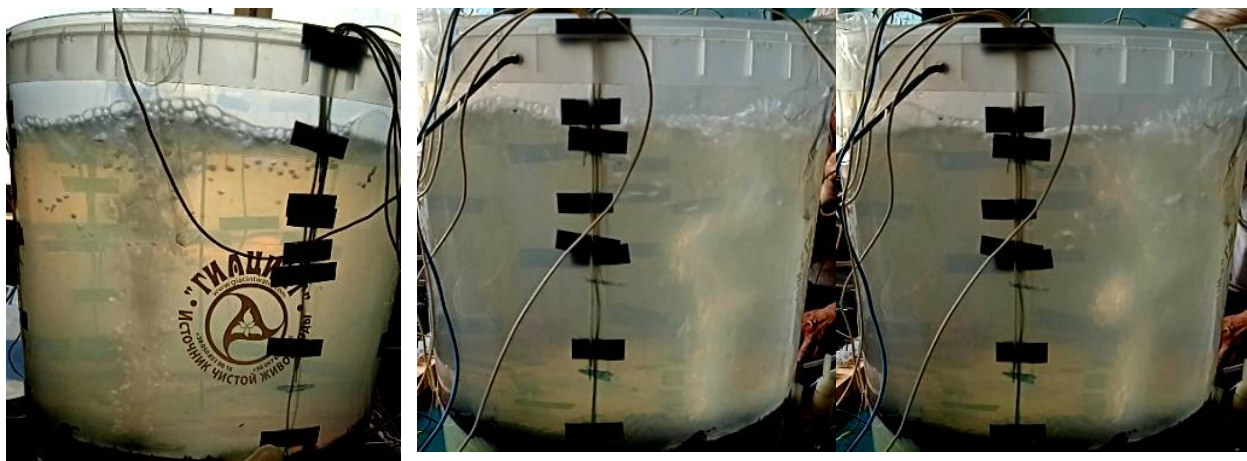


Рисунок 4.16 - Фото продувки крізь донний блок при витраті продувного газу 1,368 м³/т·год [128, 129]

Таблиця 4.2 – Оцінені за відео спостереженням частки ванни, що складає локалізований потік з бульбашок (без урахування окремого руху розрізнених бульбашок у верхній частині ванни) при різних витратах газу

№ з.п.	Витрата газу, м ³ /т·год	Частина ванни, що є потоком бульбашок (% від загального об'єму)*
1	0,171	4
2	0,342	5,9
3	0,684	8,8
4	1,026	13,4
5	1,368	4,6

* визначено за допомогою програмного пакету Coreldraw

Встановлено, що при невеликій витраті газу 0,171 м³/т·год продувка має бульбашковий характер: стовп бульбашок підіймається рівномірно догори без візуального розосередження чи злиття у струмінь. При продуванні з витратою газу 0,342 м³/т·год бульбашки починають зливатися у потік, який набуває вигляду спіралі з обертальним характером коливань. Збільшення витрати продувного газу до 0,684 м³/т·год і більше з одного боку змушує сформовані бульбашки на початку (у місці виходу з продувного блоку) все більше зливатися у міцний спіральний потік, а з іншого - у верхній частині

такий потік наче «розмотується» чи розривається і з'являється зона окремих частих бульбашок, що вітають у досить великому обсязі (тобто їх рух не поступовий догори, а вони набирають кутового прискорення від струменя і рухаються вздовж поверхні із коливальним характером руху досить довго, допоки спливають). Найбільша кількість таких бульбашок відмічена при продуванні витратою $0,684 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ - вони візуально охоплюють $1/3$ об'єму ванни у верхній частині під час свого руху (не одночасно). При збільшенні витрати газу кількість вільних бульбашок зменшується візуально і частина ванни, яка ними охоплюється під час їх руху зменшується до $1/4$ при витраті $1,026 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ та $1/10$ при $1,368 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$. Також слід відзначити, що при витраті $1,026 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ струмінь під час коливань часом відривається, тобто режим продувки часом стає пульсуючим.

Можна зробити висновок, що при продуванні з витратою $0,684$ - $1,026 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ спостерігається найбільший потік з бульбашок, які до того ж мають не тільки прямолінійний рівномірний рух, але й на деякій висоті від продувного блоку набувають імпульсний рух з кутовою швидкістю, що спричиняє перемішування в об'ємі ванни до того, як бульбашки досягнуть поверхні. При цьому слід відмітити, що відповідно до візуального аналізу та виміру електропровідності підвищення витрати продувного газу спочатку покращує процес перемішування до витрат $1,026 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$, а при перевищенні витрати – $1,368 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ вже відбувається зниження цього показника, що, мабуть пояснюється як значними силами, які тримають бульбашки до купи у потоці при такій витраті й не дозволяють розірватись на горі струменю для чинення перемішування, так і силі, що спрямована вниз й стримує розповсюдження більш щільних потоків розчину солі, яка формується при таких витратах газу. При витраті $0,684$ - $1,026 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ бульбашки організують потік, проте на деякій висоті при зростанні їх об'єму та зменшенні гідростатичного тиску цей потік розривається на окремі бульбашки, про що кажуть аналіз відео та фото вище.

Це також підтверджується графіками зміни рівня електропровідності в кінці продувки за відповідними датчиками (рис. 4.17-4.21).

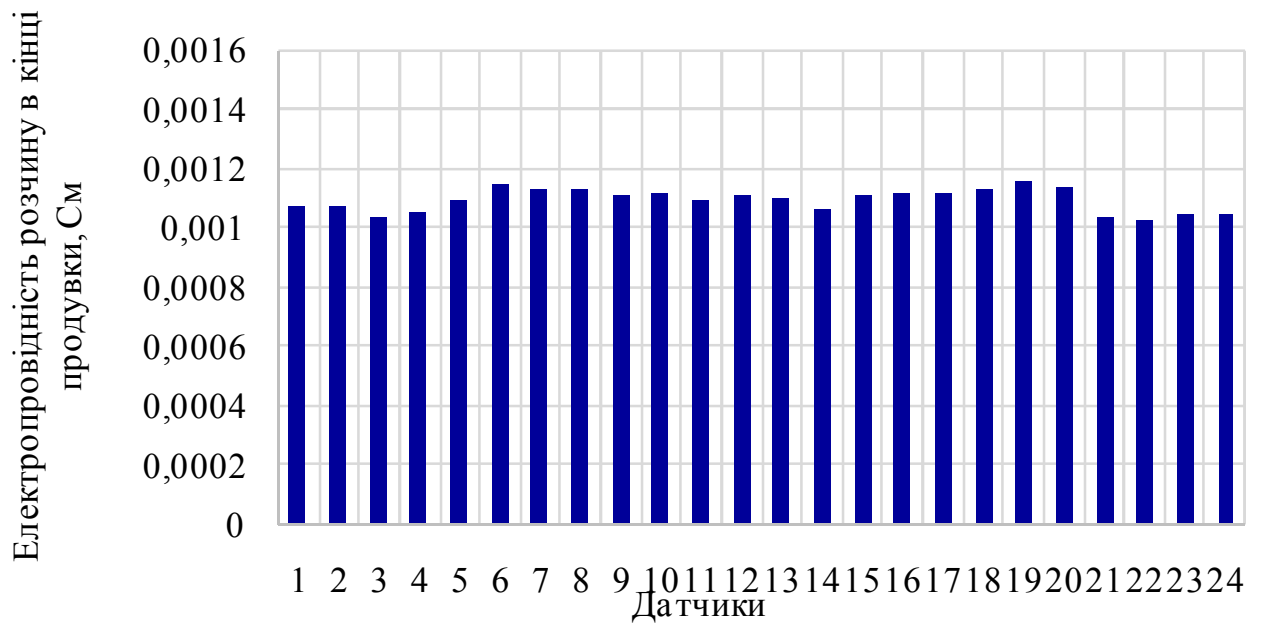


Рисунок 4.17 - Рівень електропровідності в кінці продувки за всіма датчиками при витраті продувального газу $0,171 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ [129]

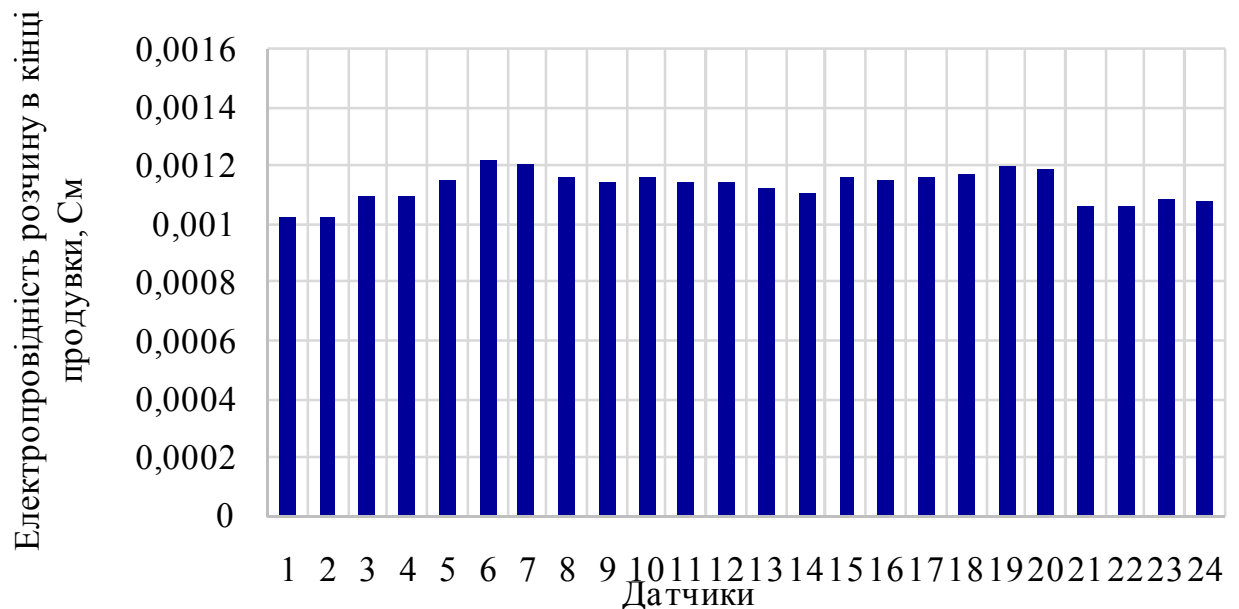


Рисунок 4.18 - Рівень електропровідності в кінці продувки за всіма датчиками при витраті продувального газу $0,342 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$. [129]

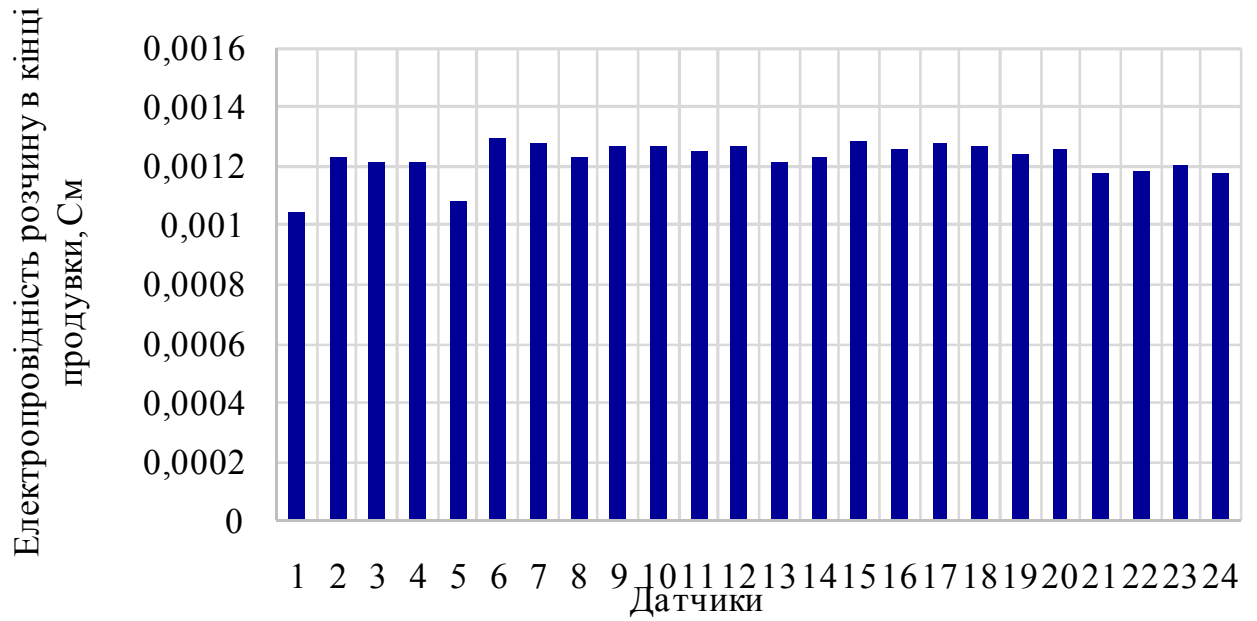


Рисунок 4.19 - Рівень електропровідності в кінці продувки за всіма датчиками при витраті продувного газу 0,684 м³/т·год. [129]

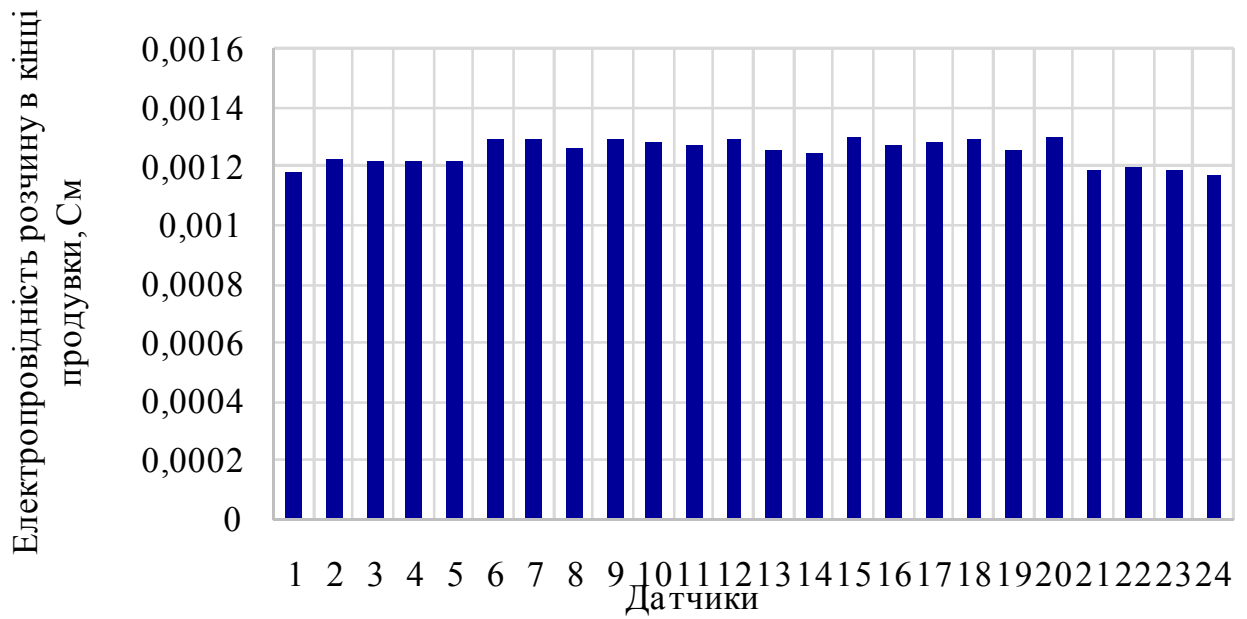


Рисунок 4.20 - Рівень електропровідності в кінці продувки за всіма датчиками при витраті продувного газу 1,026 м³/т·год [129]

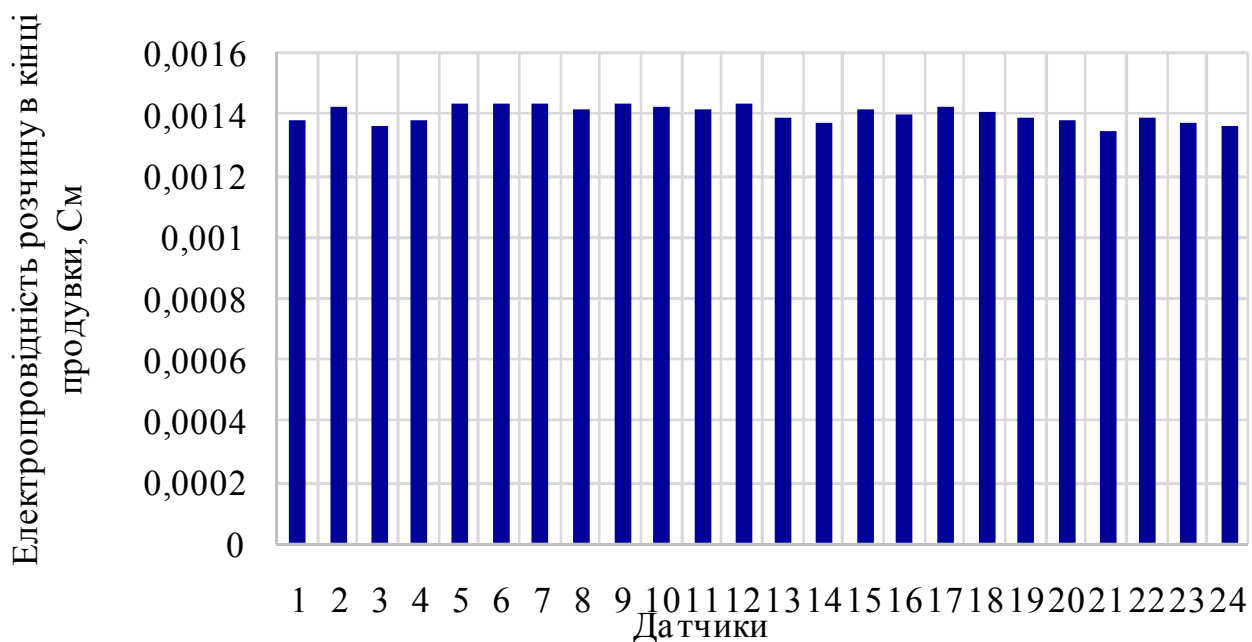


Рисунок 4.21 - Рівень електропровідності в кінці продувки за всіма датчиками при витраті продувного газу $1,368 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ [129]

Видно, що при витратах вище $0,684 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ досягається краще рівномірне розповсюдження модельної присадки – солі (найвищі показники при витраті $1,368 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$). При невеликих витратах продувного газу – $0,171 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ - спостерігається найбільша неоднорідність показників датчиків з найнижчим їх рівнем.

Цікавим є аналіз зміни отриманих даних у часі за датчиками, що розташовані близько до фурми та навпаки – на протилежній стороні ковшу (рис. 4.22 – 4.31). За наведеними рисунками можна зробити висновок, що на датчиках біля продувної фурми активніше змінюються показники вже з початку продувки. Особливо різницю видно при більших рівнях витрати продувного газу. Це свідчить про активне перемішування мас в області фурми, а коливання показників свідчить про те, що пухирці газу потрапляють на датчики, знижуючи електропровідність короточасними імпульсами, які формуються в них.

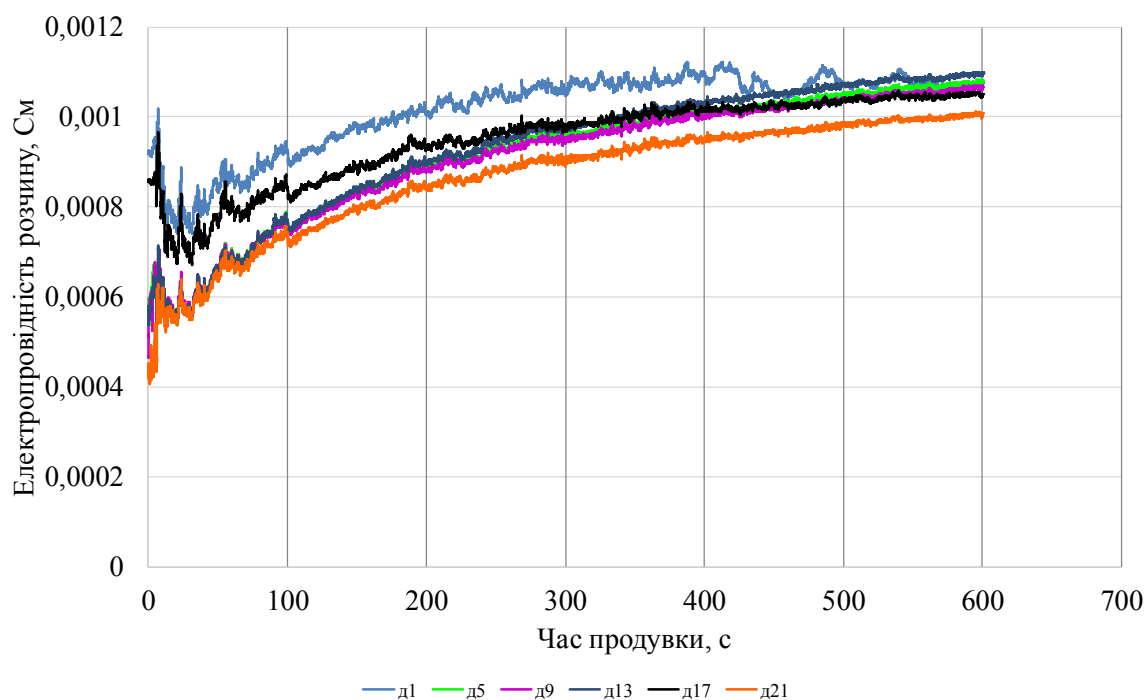


Рисунок 4.22 - Зміна електропровідності за час продувки за датчиками, що розташовані близько до продувної фурми при витраті газу $0,171 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ (д1 – д21 – номери датчиків, які аналізуються)

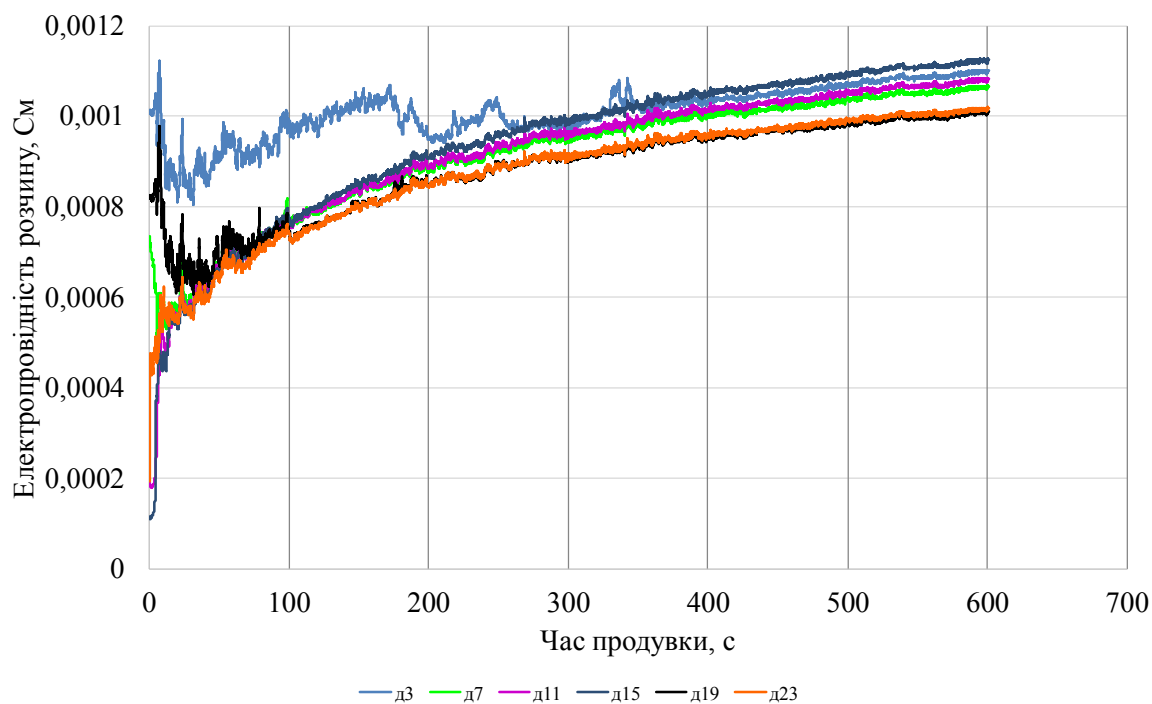


Рисунок 4.23 - Зміна електропровідності за час продувки за датчиками, що розташовані навпроти продувної фурми при витраті газу $0,171 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ (д3 – д23 – номери датчиків, які аналізуються)

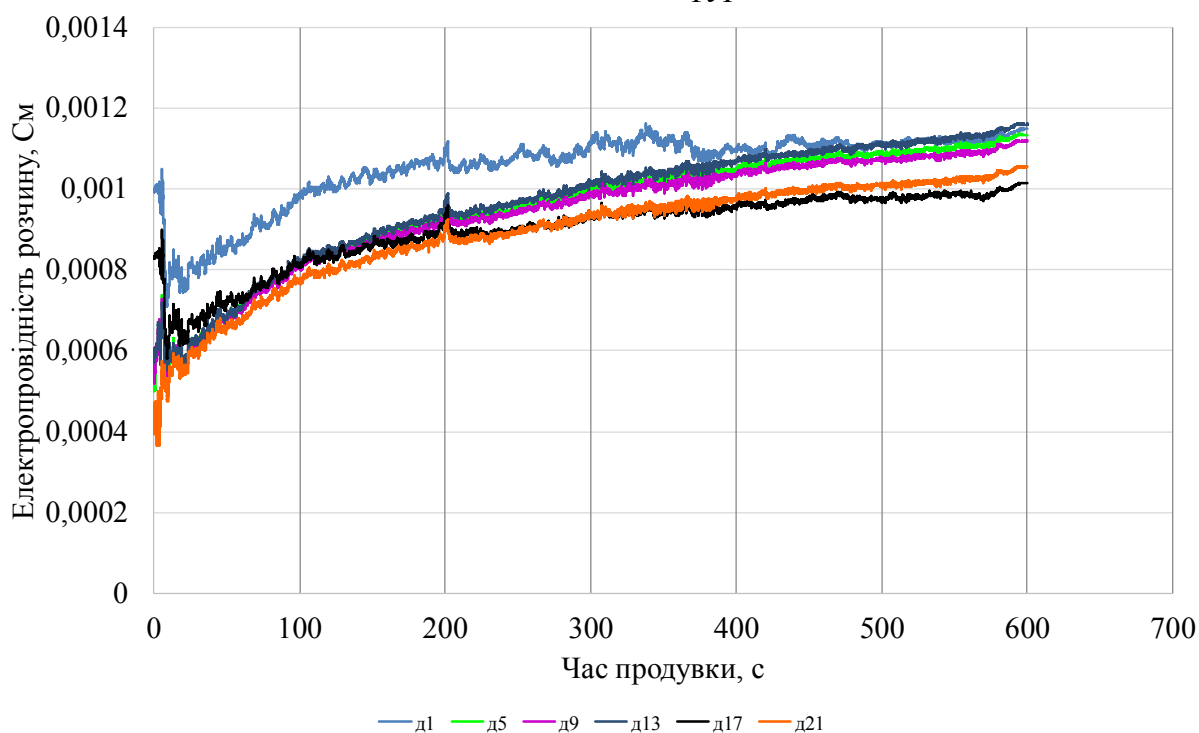


Рисунок 4.24 - Зміна електропровідності за час продувки за датчиками, що розташовані близько до продувної фурми при витраті газу $0,342 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ (д1 – д21 – номери датчиків, які аналізуються)

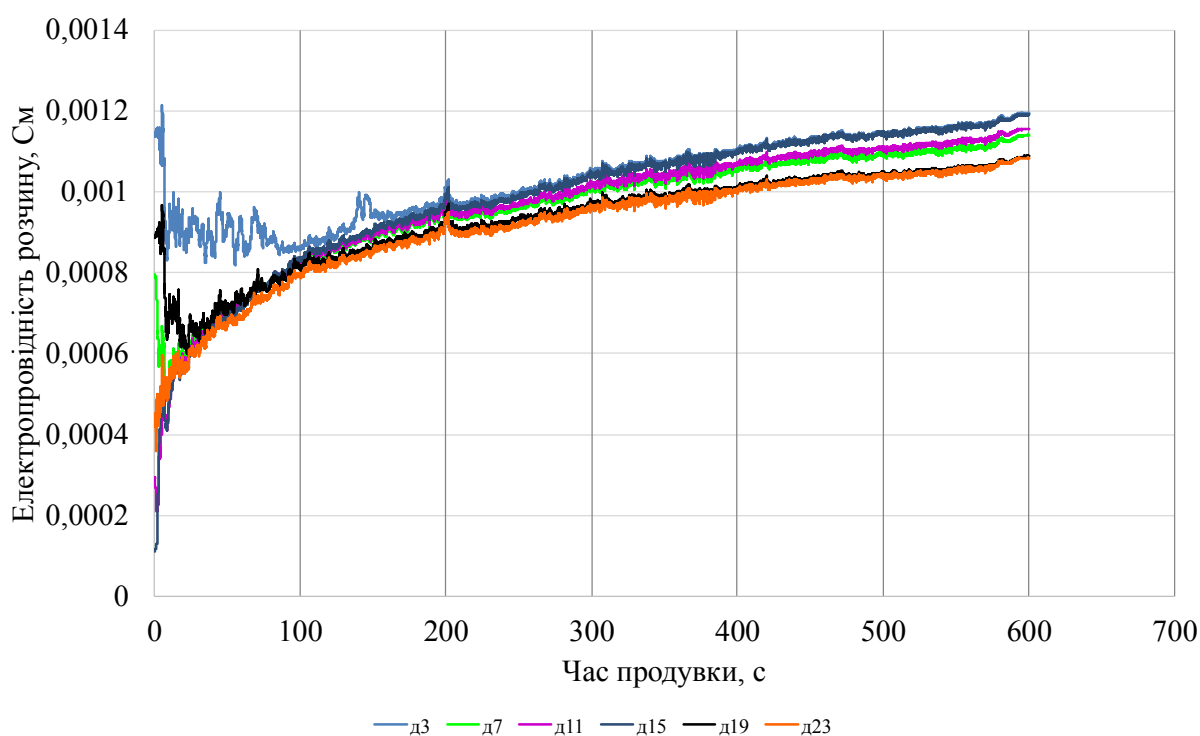


Рисунок 4.25 - Зміна електропровідності за час продувки за датчиками, що розташовані навпроти продувної фурми при витраті газу $0,342 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ (д3 – д23 – номери датчиків, які аналізуються)

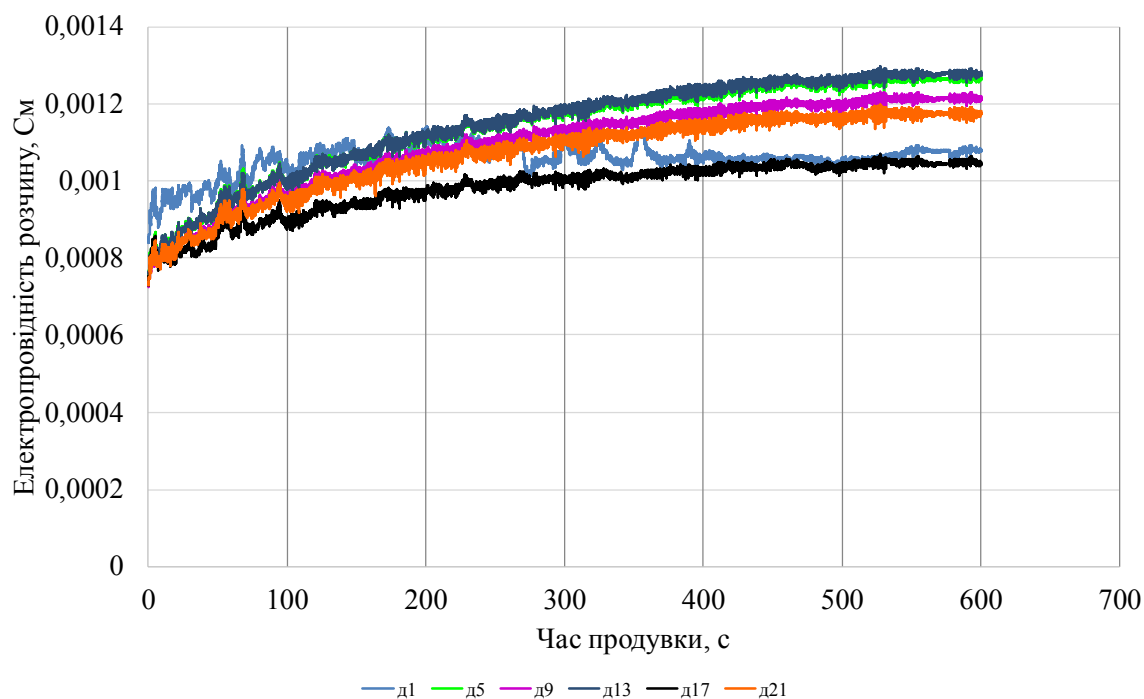


Рисунок 4.26 - Зміна електропровідності за час продувки за датчиками, що розташовані близько до продувної фурми при витраті газу $0,684 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ (д1 – д21 – номери датчиків, які аналізуються)

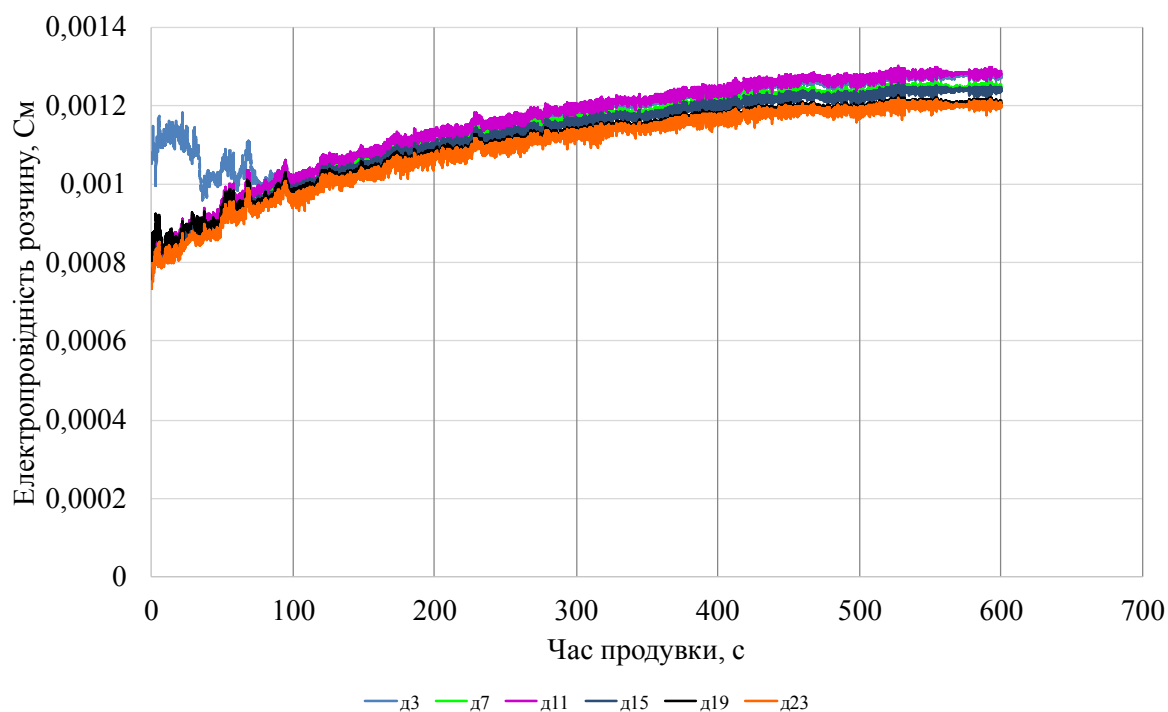


Рисунок 4.27 - Зміна електропровідності за час продувки за датчиками, що розташовані навпроти продувної фурми при витраті газу $0,684 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ (д3 – д23 – номери датчиків, які аналізуються)

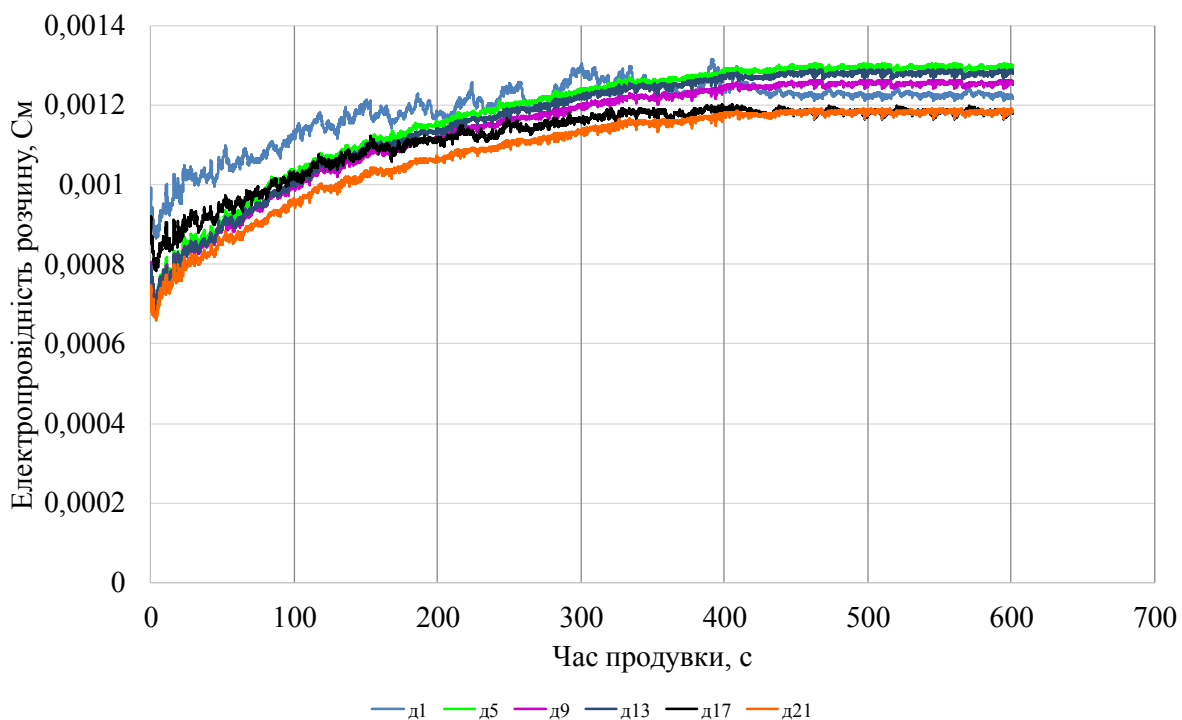


Рисунок 4.28 - Зміна електропровідності за час продувки за датчиками, що розташовані близько до продувної фурми при витраті газу $1,026 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ (д1 – д21 – номери датчиків, які аналізуються)

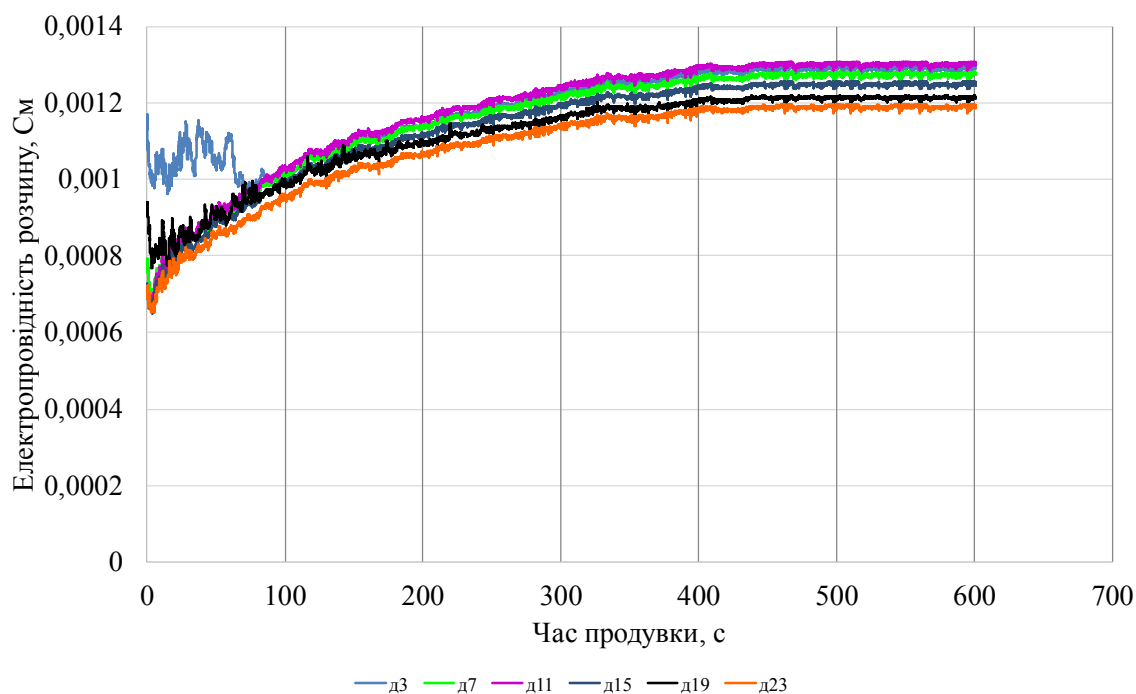


Рисунок 4.29 - Зміна електропровідності за час продувки за датчиками, що розташовані навпроти продувної фурми при витраті газу $1,026 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ (д3 – д23 – номери датчиків, які аналізуються)

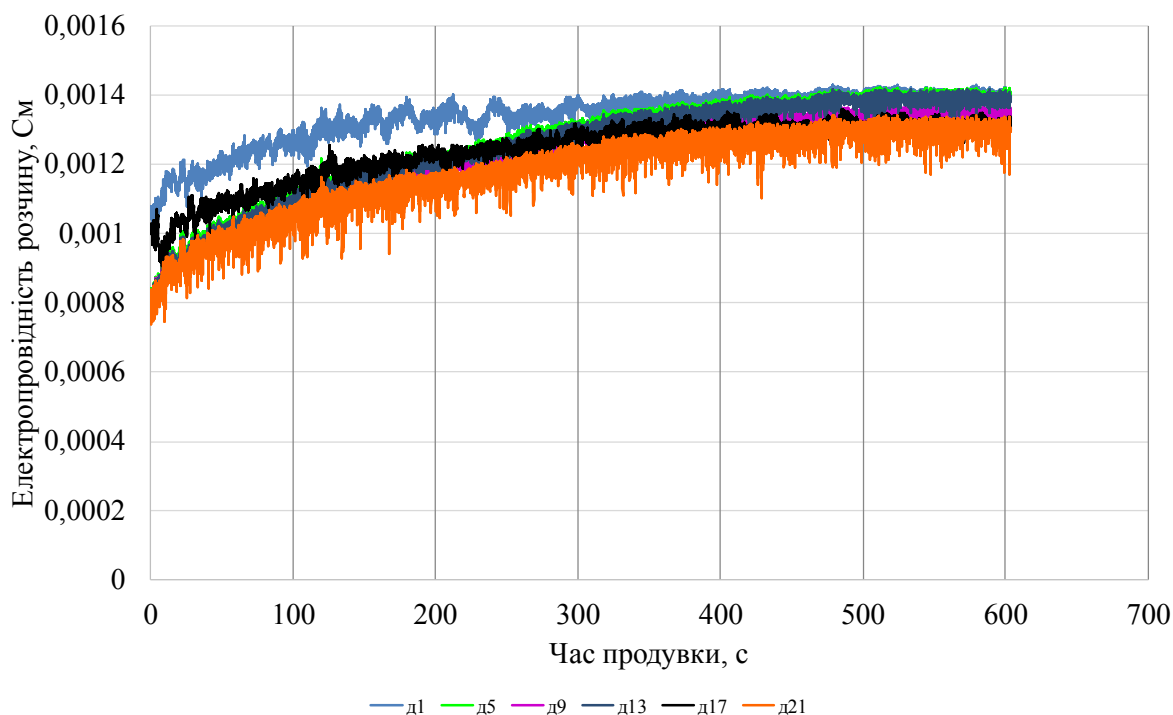


Рисунок 4.30 - Зміна електропровідності за час продувки за датчиками, що розташовані близько до продувної фурми при витраті газу $1,368 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ (д1 – д21 – номери датчиків, які аналізуються)

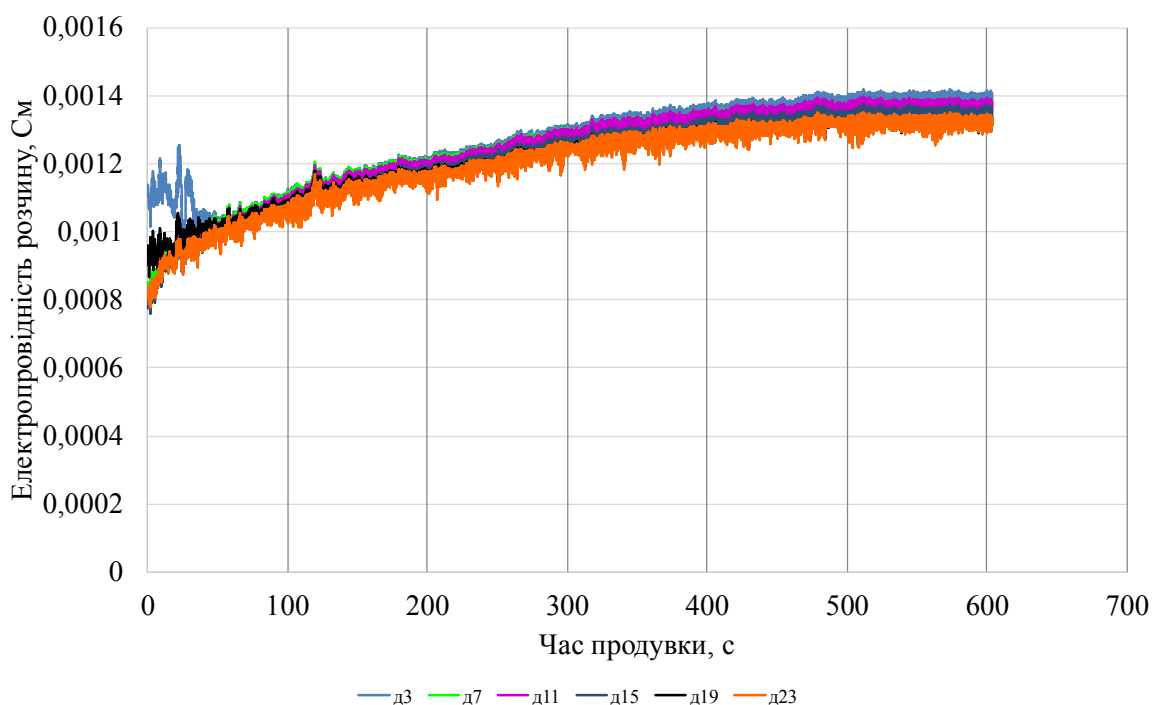


Рисунок 4.31 - Зміна електропровідності за час продувки за датчиками, що розташовані навпроти продувної фурми при витраті газу $1,368 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ (д3 – д23 – номери датчиків, які аналізуються)

Найбільше коливання показників впродовж продувки зареєстровано датчиками нижнього рівня «А_А» при витратах продувного газу до $1,026 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ - $1,368 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$. При цьому це характерно як для датчиків, що розміщені біля продувної фурми, так і для протилежно розміщених (тобто на віддаленні від фурми) датчиків. Тобто це свідчить про наявність пухирців, які не тільки підіймаються вгору під дією сила Архімеда й можуть формувати струмінь, але й вони спричиняють хвильові імпульси всій ванні під час коливань такого потоку й розповсюджуються також по нижньому рівню. «Хвилеподібна» зміна зареєстрованих даних найбільше відповідає початку продувки й продовжується до середини продувки у зв'язку з великою різницею чистої води та насичених сіллю потоків. При витраті $1,368 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ відзначається найбільше коливання ванни протягом всієї продувки й не тільки на нижньому рівні, але й на поверхні ванни. Це підтверджує встановлене за допомогою аналізу відеозаписів активне коливання потоку із періодичними пульсаціями (відривами потоку чи розрядженнями та згущеннями). Якщо на поверхні буде розташований шар шлаку, такий режим продувки буде викликати оголення металу. Менше коливання поверхні ванни спостерігалось при продуванні з витратою $0,684 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ - $1,026 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ з коротким початковим етапом коливань на нижньому рівні особливо за датчиками, що розташовані навпроти фурми. Тобто такий варіант більш привабливий з точки зору поведінки ванни, яка може зчинити оголення поверхні металу, що корелюється з даними роботи [130] для умов продувки металу у ковші через верхню погрузну фурму.

Також слід відзначити такий момент, як час досягнення системою стану, при якому концентрація розчиненої солі змінюється при подальшому перемішуванні повільно, тобто за графіками спостерігається майже лініалізація показників за деякий час до кінця продувки. Відповідні данні відображено в таблиці 4.3. Отримані данні свідчать про те, що найшвидше система набуває умовно «насиченого» стану при витраті продувного газу $1,026 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$. При більшій витраті потрібно для досягнення цього стану вже

дещо більший час, що, вірогідно, пов'язаною з дуже інтенсивним формуванням потоку бульбашок газу, які швидше лишають об'єм ванни ніж при меншій витраті, не створюючи належного перемішування.

Таблиця 4.3 - Час досягнення функцією зміни електропровідності розчину, що реєструються різними датчиками, сталого вигляду відповідно до рівня витрати продувального газу [129]

Витрата газу, %	Час, сек
0,171 м ³ /т·год	550
0,342 м ³ /т·год	426
0,684 м ³ /т·год	345
1,026 м ³ /т·год	250
1,368 м ³ /т·год	300

Висновки за розділом 4

Проведені дослідження на натурній холодній моделі сталерозливного ковша щодо впливу режимів продувки ванни сталерозливного ковша на особливості гомогенізації ванни за рахунок розчинення «важких» присадок речовин при продуванні крізь донну фурму за бульбашковим режимом показали наступне:

- під час продувки крізь блок з ненаправленою пористістю формується потік бульбашок, який не тільки підіймається вгору під дією сил Архімеда, але й створює додатковий рух середовища в прилеглих до потоку бульбашок шарах ванни;
- під час продувки у бульбашковому режимі найбільша зміна концентрації за час продувки відбувається в серединному об'ємі ванни ковша;

- найкращі умови перемішування ванни та найкоротший час її гомогенізації створюються при продуванні з інтенсивністю подачі продувного газу $0,684-1,026 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{сталі год}$;
- найкращі умови щодо коливання рідкої ванни, які не повинні утворювати ділянки оголеного металу під час продувки створюються при інтенсивності введення продувного газу $0,684-1,026 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{сталі}\cdot\text{год}$;
- за відведений при проведенні досліджень час продувки заплановану концентрацію розчину 1% було досягнуто при інтенсивності введення у ванну газу $1,026 -1,368 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{сталі год}$, при більш швидкому досягненні «гомогенного» стану рідкої ванни при інтенсивності подачі газу $1,026 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{сталі год}$.

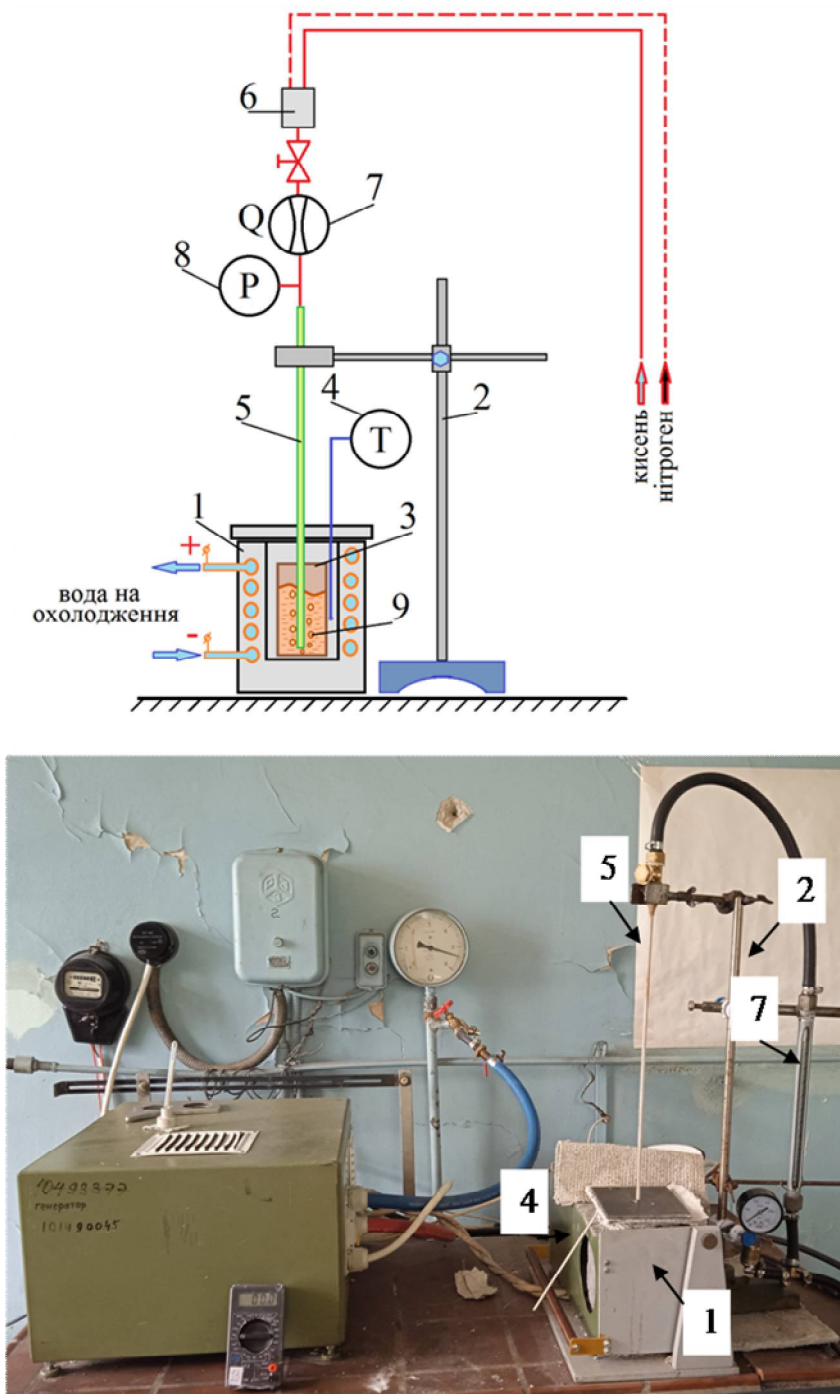
Тобто рекомендацією для продування ванни у сталерозливному ковші крізь донний блок з ненаправленою пористістю у бульбашковому режимі для досягнення швидкого гомогенного стану при додаванні «важких» присадок є продувка з інтенсивністю введення газу на рівні $0,36 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{сталі}\cdot\text{год}$ (при перерахуванні на реальний промисловий об'єкт – сталерозливний ківш ємністю 250т). Крім того відповідно до даних наведених у роботах [131, 132] при зазначених витратах спостерігається збільшення зони контакту металевої ванни на рівні 3-5%, що є прийнятним для промислових умов.

Розділ 5. ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ОКИСЛЕННЯ ВУГЛЕЦЮ ПРИ ДОННОМУ БУЛЬБАШКОВОМУ ПРОДУВАННІ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВОГО РОЗПЛАВУ СУМІШШЮ КИСЕНЬ – ІНЕРТНИЙ ГАЗ

З метою оцінки можливості окислення вуглецю при його невеликій кількості у розплаві за умов донного продування сумішшю газів, що містить кисень, у бульбашковому режимі було проведено високотемпературне фізичне дослідження. Основою моделі була 1 кг індукційна піч. Донну бульбашкову продувку змодельовали шляхом використання алунової трубки, яка відтворювала одиничний канал пористого донного блоку (рис. 5.1).

5.1 Методика проведення високотемпературного дослідження

У алуновому тиглі було розплавлено 500 г металеві шихти (Ст 3) з вмістом вуглецю 0,3% мас.. Продувку здійснювали крізь алунову трубку з діаметром отвору 2 мм, яку по расплавленню металеві ванни було занурено крізь отвір у кришці моделі до самого дна тиглю. Продувний газ складався із суміші кисню та азоту у кількості 10%х95%, 30%х70%, 50%х50% відповідно. Перед подачею у рідку ванну газу змішувалися у спеціальній змішувальній камері. Камера для змішування технологічних газів була розроблена на основі попередньо проведених лабораторних досліджень з урахуванням забезпечення повного змішування двох газових потоків із розташуванням каналів введення газів у камеру під кутом до вертикальної вісі в межах 25-40°. Камера – змішувач виконаний у формі циліндра. Тиск газів після виходу з кожного з балонів контролювали за допомогою манометрів, а витрата газової суміші контролювалася за допомогою витратоміра РМ-0,063Г й складала 0,075 л/год. Час продувки складав 4 хвилини.



1- індукційна піч, 2 – штатив, 3 – алундовий тигель, 4 – термопара, 5 – керамічна продувна фурма, 6 – змішувач продувних газів, 7 – витратомір, 8 – манометр, 9 – бульбашки газу

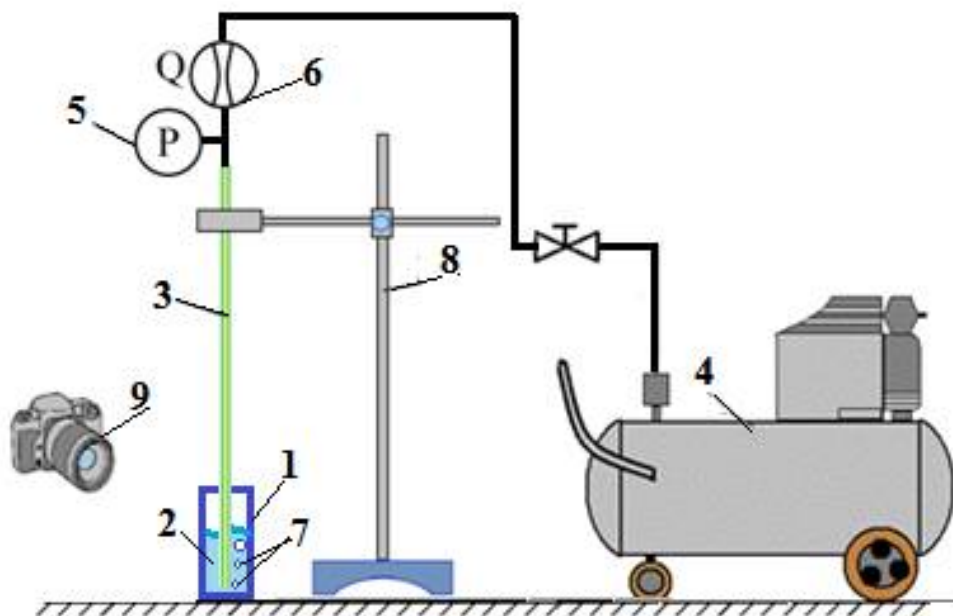
Рисунок 5.1 - Фото та функціональна схема високотемпературної моделі

Температуру розплаву контролювали термопарою, яка була розташована за тиглем (за допомогою встановленого заздалегідь коефіцієнту перерахунку) та

перед продувкою погрузною термопарою. Протягом продувок з різним співвідношенням газів кожену хвилину відбирали проби металу для проведення подальшого хімічного аналізу спектральним методом.

5.2 Дослідження на холодній фізичній моделі задля визначення дугтьових параметрів високотемпературного моделювання

Попередньо проведенню високотемпературного моделювання було досліджено гідродинамічні особливості модельного варіанту продувки (з імітацією одного продувного донного каналу, що створений погрузною до дна одно сопловою керамічною фурмою) (рис. 5.2).



1 – прозора ємність, 2 – вода, 3 – керамічна одно соплова продувна фурма, 4 – компресор, 5 – манометр, 6 – витратомір, 7 – бульбашки продувного газу, 8 – штатив, 9 - відеокамера

Рисунок 5.2 - Функціональна схема холодного фізичного моделювання продувки в індукційній печі

Дослідження проведено на холодній моделі з використанням у якості тиглю прозорої скляної ємності, у якості рідкого розплаву - води, яку продували повітрям з встановленою для високотемпературного моделювання витратою:

0,025 л/год; 0,05 л/год; 0,075 л/год та 0,1 л/год. Продувний пристрій занурювали до самого дна ємності. Процес продувки фіксували на відеокамеру и проаналізували. На рис. 5.3 наведено характерні фото продувки.

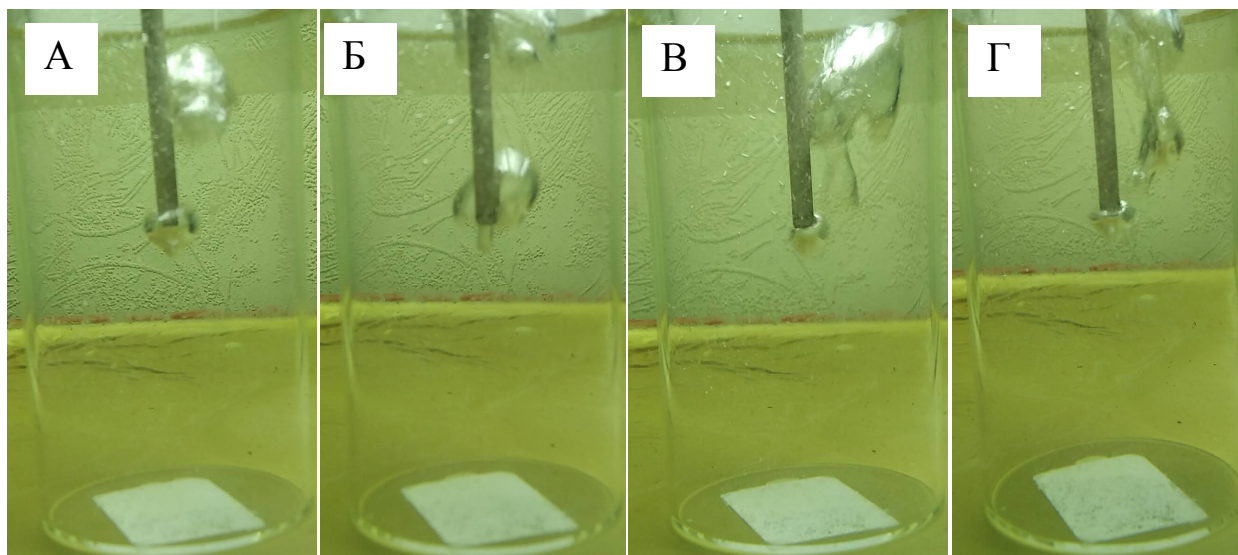


Рисунок 5.3 - Характерні фото холодної продувки за модельних умов при продуванні з витратою: А – 0,025 л/год; Б - 0,05 л/год; В - 0,075 л/год та Г - 0,1 л/год.

Встановлено візуально, що за модельних умов кращому варіанту продувки відповідає витрата продувного газу 0,075 л/год за об'ємом ванни, що охоплено газовою складовою й, відповідно, може бути залучена до реакції. Для підтвердження візуального висновку було проведено розрахунки за наявним відеорядом дійсного об'єму газу, який формується при продуванні з різними витратами за формулою (знаючи, відповідно, реальні геометричні параметри модельної ємності - $50 \cdot 10^{-3}$ м для перерахунку виміряних лінійних розмірів):

$$V = \int_a^b S(x) dx, \quad (5.1)$$

де a й b фактично координати висоти об'єкта, який формується продувним газом у рідині; S – площа перетинів цього тіла, що змінюється в залежності від зміни координати від a до b , m^2 .

Фактично отриманий відеоряд проаналізований з використанням програмного забезпечення Coreldraw. Відповідно до розрахунків встановлено, що за витрати 0,025 л/год об'єм газової порожнини складає $3,7 \cdot 10^{-6} m^3$; за витрати 0,05 л/год – $5,06 \cdot 10^{-6} m^3$; за витрати 0,075 л/год – $5,06 \cdot 10^{-6} m^3$ та за витрати 0,1 л/год – $3,4 \cdot 10^{-6} m^3$. Тобто найбільш раціональною витратою для даних умов є витрата продувного газу 0,075 л/год.

5.3 Результати високотемпературного дослідження особливостей взаємодії залізовуглецевого розплаву із сумішшю кисень – нейтральний газ

Відповідно до візуального спостереження за ходом високотемпературного моделювання продувки можна сказати, що чим більша частка кисню була у суміші продувних газів, тим вище й чіткіше полум'я спостерігалось з технологічного отвору кришки моделі. Крім того при високому вмісту кисню у продувній суміші за час продувки продувний пристрій сильно розігрівся та почав плавитися, чого не відбувалося при вмісті кисню на рівні 30% й нижче за рахунок охолоджуючого ефекту нейтрального газу у суміші.

Хімічний аналіз результатів продувок показав, що при використанні суміші газів, яка містить кисень, відбувається зниження вмісту вуглецю в розплаві. При цьому поведінка інших компонентів залежить від вмісту кисню у продувній суміші. На рис. 5.4 – 5.6 наведені діаграми зміни вмісту компонентів у розплаві за час продувки при різних частках кисню у продувному газі [129, 133, 134].

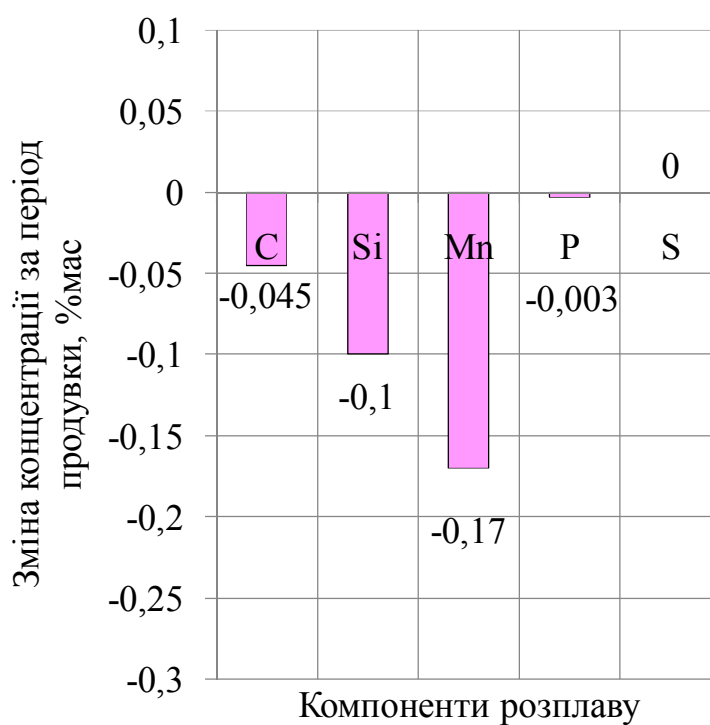


Рисунок 5.4 - Зміна концентрації компонентів розплаву за час продувки 4 хв. (біля стовпчиків вказана різниця концентрацій за продувку) при вмісті кисню у продувному газі 10%

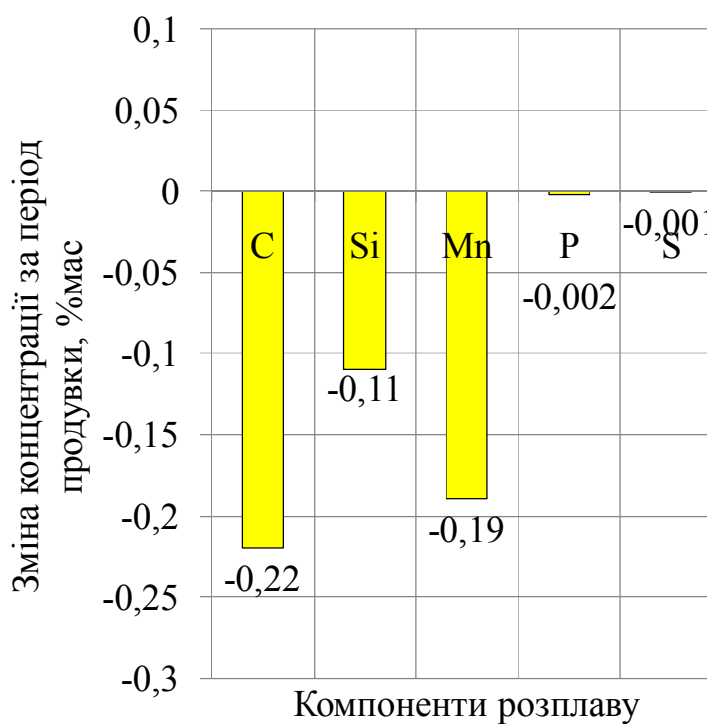


Рисунок 5.5 - Зміна концентрації компонентів розплаву за час продувки 4 хв. (біля стовпчиків вказана різниця концентрацій за продувку) при вмісті кисню у продувному газі 30%

Відмічено, що при продуванні газовою сумішшю з вмістом кисню 30% відбувається активне окислення вуглецю з невеликим окисленням всіх інших компонентів розплаву (див. рис. 5.5). При продуванні з більшою часткою кисню відмічено, відповідно, більше окислення вуглецю, проте відмічено активне, значно більше окислення всіх інших компонентів розплаву. Цей факт не є бажаним при позапічній обробці рідкої сталі, бо продувка здійснюється на розплаві, який одночасно повинен засвоювати необхідні компоненти для доведення сталі до необхідних технологічних показників.

При продуванні розплаву з меншою часткою кисню вуглець в металі теж окислюється, проте в невеликій кількості. Встановлений показник окислення вуглецю за таких умов не може задовольнити необхідному технологічному показнику зневуглецювання. Крім того, у зв'язку зі зниженням температури розплаву через продувку нейтральним газом для перемішування, відбувається ще й значне окислення всіх інших важливих компонентів розплаву.

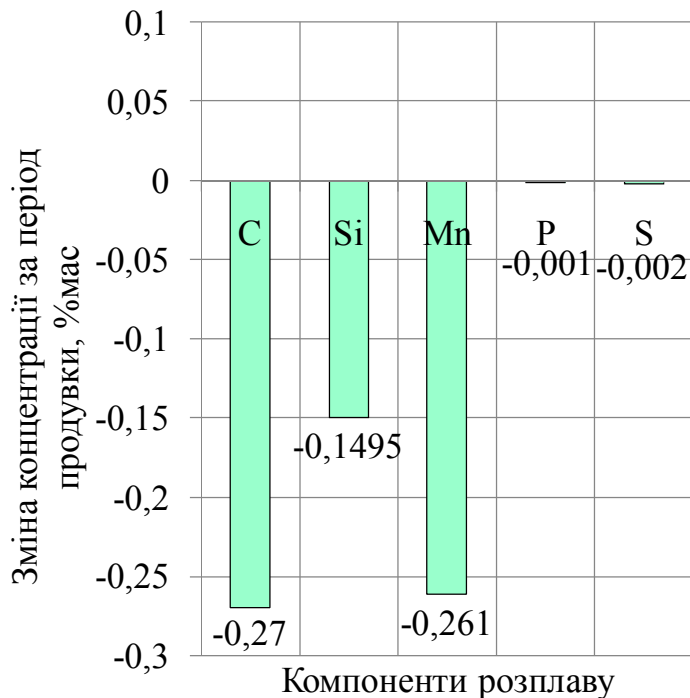


Рисунок 5.6 - Зміна концентрації компонентів розплаву за час продувки 4 хв. (біля стовпчиків вказана різниця концентрацій за продувку) при вмісті кисню у продувному газі 50%

Аналіз зміни концентрації вуглецю у розплаві за ходом продувки показав наступне (рис. 5.7). При наявності кисню у продувному газі залежність зміни концентрації вуглецю у часі має загальний схожий характер поліноміальної регресії не залежно від частки кисню. При цьому чим нижче вміст кисню у продувній суміші, тим менша частка вуглецю окиснюється за однаковий час продувки.

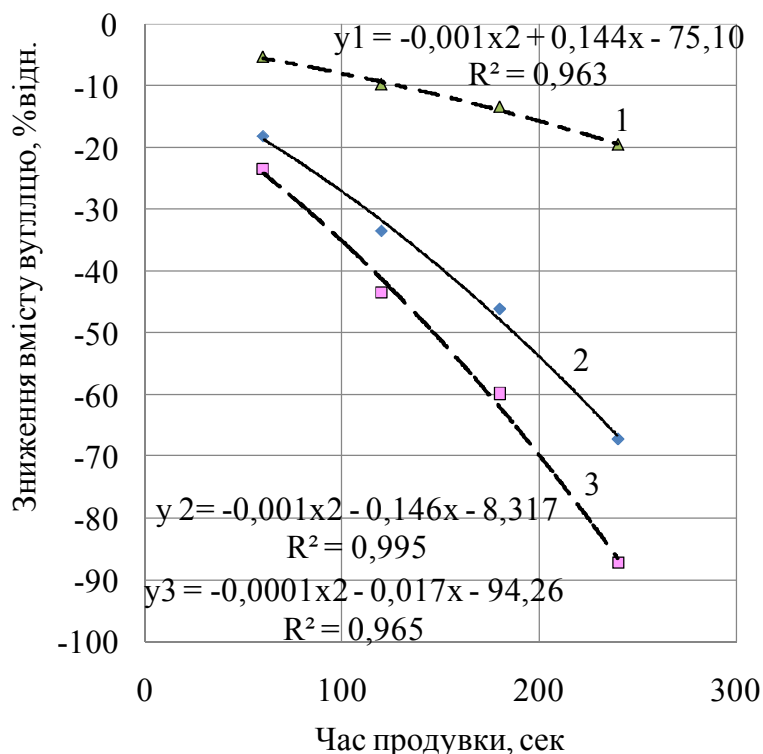


Рисунок 5.7 - Зниження вмісту вуглецю за час продувки при різних частках кисню у продувному газі: 1 – 5%, 2 – 30%, 3 – 50%

Швидкість окислення вуглецю в середньому за плавку в залежності від вмісту кисню у продувній суміші представлена в таблиці 5.1. Відмічено, що для умов продувки сумішшю газів з часткою кисню 30% швидкість окиснення вуглецю складає 0,056 %мас./хв. Тобто окислення вуглецю знаходиться на рівні електродугового чи мартенівського процесів. Це свідчить про достатній окислювальний потенціал кисню щодо вуглецю при концентрації кисню у суміші продувного газу 30% за умов донної продувки в

ковші й комплексі з встановленим вище фактом активного перемішування розплаву за умов досліду (бо велика частка розплаву була оброблена продувною сумішшю за час продувки).

Таблиця 5.1 Порівняння швидкостей окислення вуглецю при різних частках кисню в продувній суміші

Частка кисню в газовій суміші, %	10	30	50
Швидкість окислення вуглецю, %мас/хв.	0,009	0,056	0,065

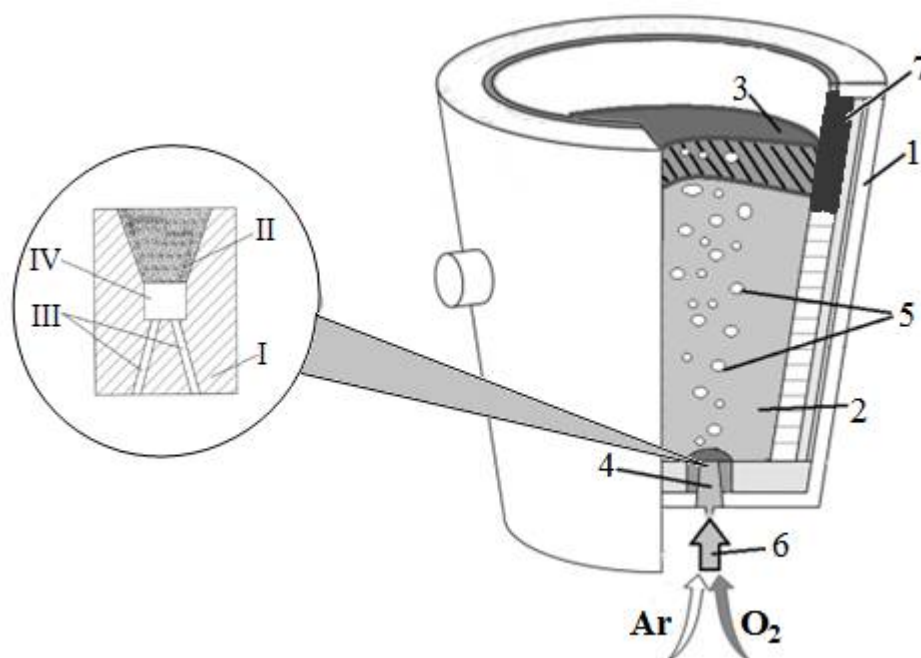
Відповідно можливо спрогнозувати, що при обробці розплаву за умов 30% вмісту кисню у суміші продувного газу необхідно час обробки 8-10 хвилин для зниження концентрації вуглецю у розплаві на 0,2% мас.

Додатково можна спрогнозувати що впровадження на металургійних підприємствах двостадійної технології окислення вуглецю при виплавці сталі (окислення до концентрації 0,15-0,2% мас. у кисневому конвертері та подальше окислення у сталерозливному ковші за технологією донної продувки сумішшю технологічних газів, що включає кисень та нейтральний газ) дозволить знизити загальний вихід металургійних шлаків приблизно на 25-30% по відношенню до класичної технології виплавки сталі у кисневих конвертерах.

5.4 Рекомендації щодо промислового застосування розробленого способу

З метою промислового використання розробленої конструкції і технології пропонуються наступні рекомендації.

1. Конструкція сталерозливного ковша повинна забезпечувати його безаварійну роботу та високу стійкість, тому рекомендовані вдосконалення, представлені на рисунках 5.8.



1 – ківш стандартної конструкції; 2 – рідка сталь; 3 – шлаковий розплав; 4 – проувний донний блок, спеціальної конструкції; 5 – бульбашки, заповнені сумішшю технологічних газів, що включає кисень; 6 – змішувач продувних газів; 7 – додатково укріплена зона шлакового поясу; I – вогнетривкий газонепроникний матеріал; II – конічний канал, заповнений газопроникним вогнетривким матеріалом; III – циліндричні канали для підведення технологічних газів; IV – камера-змішувач циліндричної форми

Рисунок 5.8 - Схематичне зображення сталерозливного ковша, який обладнано для рафінування сталі сумішшю технологічних газів

Відповідно до рисунків рекомендується для забезпечення високої стійкості вогнетривкої футерівки враховуючи наявність оксидів заліза та марганцю в шлаку виконувати зону футерівки шлакового поясу з високостійких периклазо-вуглецевих вогнетривких матеріалів, або жароміцних бетонів схожого складу. Що стосується продувного блоку, запропонована конструкція може бути вмонтована у стандартне гніздо будь-якого

сталерозливного ковша. Вогнетривкий блок виконується зі стандартних вогнетривких матеріалів для виконання вогнетривких продувних блоків.

2. Щодо складу реагентів та їх витрат встановлено, що раціональний склад продувних газів 20-30% кисню та інше – нейтральний газ аргон. Витрата суміші газів 0,3 – 0,4 м³/т сталі·год за умов продувки у сталерозливному ковші ємністю 250т з переходом на чистий аргон через 10 хвилин продувки.

3. Враховуючи що шлакова фаза, яка утворюється в процесі обробки, містить оксиди заліза та марганцю, необхідно забезпечити можливість скачування шлаку на етапі після обробки перед остаточним легуванням розплаву.

Висновки за розділом 5.

Проведено високотемпературне фізичне моделювання продувки залізовуглецевого розплаву з невеликим вмістом вуглецю (0,3%мас) сумішшю кисень – нейтральний газ через одинарний продувний канал, що імітує бульбашковий режим продувки. Встановлено, що раціональним з точки зору окислення вуглецю та експлуатації продувних пристроїв є вміст у газовій суміші кисню 20-30%. При цьому процес окислення відбувається зі швидкістю 0,056%мас/хв.

Висновки

В ході виконання проведеної роботи отримані результати можна узагальнити у наступних висновках:

1. Проведено критичний огляд технічних рішень щодо виробництва сталей з низьким вмістом вуглецю. Відповідно до нього встановлено, що існуючі методи відрізняються використанням складного спеціального технологічного устаткування та значними особливостями технологічного процесу. Використання традиційних методів для виробництва сталей з низьким вмістом вуглецю пов'язано зі значними втратами виходу придатного та зниження стійкості вогнетривкої футерівки. Таки чином обґрунтована необхідність створення нової технології виробництва сталей з низьким вмістом вуглецю, яка дозволяє без значних капіталовкладень реалізувати зазначений процес в умовах вітчизняних сталеплавильних виробництв.
2. Проведено теоретичне дослідження процесів видалення вуглецю зі сталі для умов ковшової обробки за рахунок термодинамічних показників, насамперед вільної енергії Гіббса, що вказує на можливість протікання реакцій у напрямку утворення продуктів. Встановлено, що для умов окислення в ковші вирішальну роль має надлишковий тиск, який впливає на систему. Зокрема, для умов 250-т ковша зі збільшенням тиску, тобто зі збільшенням глибини ковшу, протікання хімічної реакції окислення вуглецю до СО при розміщенні реакційної зони біля днища ковша збільшується на 19% відн. у порівнянні з протіканням реакції на межі метал – шлак. Тобто видалення вуглецю зі сталі нижче критичної концентрації доцільно проводити на етапі позапічної обробки з продувкою кисеньвмісним газом через днище.
3. Враховуючі кінетичні особливості окислення вуглецю в металевій ванні було запропонована модернізована конструкція донного продувального блоку з додатковою камерою змішування технологічних газів, який дозволяє проводити обробку рідкої сталі сумішшю газів, що містить кисень.
4. Шляхом проведення фізичного стендового дослідження з використанням тіньової зйомки встановлено, що раціональний режим

взаємодії газових струменів у камері змішувача досягається при їх розміщенні під кутом 25-40° до вертикальної вісі.

5. Низькотемпературне фізичне дослідження різних типів продувних бульбашкоувтворювачів дозволив уточнити особливості перемішування рідкої ванни й встановити, що за використання ненаправленої пористості та щільних продувних блоках час змішування на 20-40% у порівнянні з круглими наскрізними отворами.

6. З використанням низькотемпературної моделі 250-т ковша, оснащеної донним продувним блоком з ненаправленою пористістю за електрокондуктивною методикою встановлено, що раціональною для забезпечення перемішування ванни є інтенсивність продувки $1 \text{ м}^3/\text{т год}$ (при перерахунку на реальний промисловий 250-т ківш це відповідає інтенсивності $0,268 \text{ м}^3/\text{т-год}$). Також встановлено гідродинамічні особливості процесу перемішування ванни при дослідженій інтенсивності, що полягає у виникненні горизонтальних, тангенціальних потоків, які пульсують й залучають найбільшу частину ванни до перемішування.

7. В ході виконання високотемпературного моделювання в лабораторних умовах було випробувано розроблену технологію окислення вуглецю у металевій ванні за рахунок продувки сумішшю технологічних газів, що містить кисень у бульбашковому режимі. Встановлено, що раціональним з точки зору окислення вуглецю та експлуатації продувних пристроїв є вміст у газовій суміші кисню 20-30%. При цьому процес окислення відбувається зі швидкістю $0,056\% \text{ мас/хв}$.

Перелік літературних посилань

1. Кравчук Н. М, Матросова І. Д. Тенденції розвитку металургійної промисловості України: глобальна конкурентоспроможність та інноваційний аспект. *Приазовський економічний вісник*. 2020. № 1(18), С. 32 – 37.
2. Венгер В. В., Романовська Н. І., Чижевська М. Б. Тенденції та вектори розвитку металургійної галузі України. *Агросвіт*. 2022. № 4, С. 37 – 42.
3. Нарівський А., Смірнов О., Тимошенко С. Сталеплавильне виробництво в Україні: сучасний стан та перспективи (огляд). *Метал та литво України*. 2022. № 30(3), С. 28 – 46.
4. Бабенко М. Не лише «Азовсталь». Скільки металургійних заводів втратила Україна під час війни. 2022 URL: <https://focus.ua/uk/economics/547509-ne-tolko-azovstal-skolko-metallurgicheskikh-zavodov-poteryala-ukraina-vo-vremya-voyny>.
5. Глущенко А. Як українська металургія пройшла випробовування на міцність у 2023 році. URL: <https://gmk.center/ua/posts/yak-ukrainska-metallurgiya-projshla-viprobovuvannya-na-micnist-u-2023-roci/>
6. Україна у світовому металургійному виробництві за 8 місяців 2024 р. URL: <https://www.ukrmetprom.org/ukraina-u-svitovomu-metallurgijnomu-v-43/>
7. Share of EAF route in global steel production likely to rise to 40% in 2030 – Big Mint analysis. URL: <https://www.seaisi.org/details/25179?type=news-rooms>
8. Cappel J., Ahrenhold F., Egger M. W., Hiebler H., Schenk J. 70 Years of LD-Steelmaking – Quo Vadis? *Metals*. 2022. Vol. 12, P. 912 – 926
9. Aleksashin A. L., Schnaltzger I. & Hollias G. Creation and growth of oxygen-converter steelmaking. *Metallurgist*. 2007. Vol. 51, P. 60 – 65
10. August 2024 crude steel production. URL: <https://worldsteel.org/media/press-releases/2024/august-2024-crude-steel-production/#:~:text=World%20crude%20steel%20production%20for,decrease%20compared%20to%20August%202023>.

11. ДСТУ EN 10020:2007. Сталі. Визначення й класифікація (EN 10020:2000, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=50474
12. Бойченко Б. М., Охотський В. Б., Харлашин П. С. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія. Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2006. 454с.
13. Singh R. Classification of steels. Applied Welding Engineering (Third Edition). Processes, Codes, and Standards, 2020. P. 53 – 60.
14. Islam T., Rashed H. M. M. A. Classification and application of plain carbon steels. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2019.
15. Shibata K., Asakura K. Transformation behavior and microstructures in ultra-low carbon steels. *ISIJ International*. 1995. vol. 35(8), P. 982 – 991
16. Coppard R., Coulon P., Koyama Y. Impact of carbon macrosegregation on the mechanical properties of low-alloy steel forgings. ASME 2019 *Pressure Vessels & Piping Conference*, July 14 – 19 2019 San Antonio, Texas, USA. Paper No: PVP2019-94059, V06BT06A023.
17. Левченко Г. В., Бобырь С. В., Дёмина Е. Г. Оптимизация химического состава и микролегирования низкоуглеродистых сталей для изготовления штампов горячего деформирования. *Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении*. 2012. №1, С. 160 – 167
18. Singh R. Stresses, shrinkage, and distortion in weldments. Applied Welding Engineering (Third Edition). Processes, Codes, and Standards. 2020. P. 207 –249
19. Bodude M. A., Momohjimoh I. Studies on effects of welding parameters on the mechanical properties of welded low-carbon steel. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2015. Vol. 03(03), P.142 – 153
20. Storozheva L. M. Ultralow carbon steels for the automotive industry with the effect of hardening due to drying of finished parts. *Metal Science and Heat Treatment*. 2001. Vol. 43, P. 336 – 344.

21. Liu Z., Li W., Shao X. An ultra-low-carbon steel with outstanding fish-scaling resistance and cold formability for enameling applications. *Metall. Mater. Trans. A*. 2019. Vol. 50, P. 1805 – 1815.
22. Зражевский А. Д., Чернятевич А. Г., Сущенко А. В., Гриценко А. С. Состояние и дальнейшее совершенствование конструкций кислородных фурм в конвертерных цехах Украины. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. № 6, С. 20 – 30.
23. Сущенко А. В. Совершенствование и оптимизация дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2009. вып. 19, С. 36 – 41
24. Wang Z., Liu H., Wei S., Liu Q., Lu X. Effect of blowing parameters on bath mixing efficiency during basic oxygen furnace steelmaking process. *Engineering Reports*. 2021. Vol. 3, P. 1 – 10
25. Odenthal H.-J., Grygorov P., Reifferscheid M., Schlüter J. Advanced blowing and stirring conditions in the BOF process. AISTech 2013 – *The Iron & Steel Technology Conference and Exposition*, 6-9 May 2013, Pittsburgh, PA., USA, 2013. P. 897 – 909
26. Лухтура Ф. И. О критической концентрации углерода в расплаве конвертера. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки*. 2012. вип. 24, С. 49 – 56.
27. Сущенко А. В. Определение критической концентрации углерода в конвертере с верхней продувкой. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки*. 2003. вип. 13, С. 56 – 62.
28. Metal refining method using differing refining oxygen sequence: patent US6432163B1. Aug. 13, 2002
29. Method for producing low carbon steel: patent US20050160876A1. Jul. 28, 2005
30. Li Z.-Z., Zhu R., Liu R.-Z., Wang X.-L. Comparison of smelting effects by bottom blowing different gases. *Iron and Steel*. 2016. Vol.51(9), P. 40 – 45

31. Production of ultra low carbon steel by the basic oxygen process: patent US4397685A. Aug. 9, 1983
32. Production of molten extra low carbon steel: patent JPS57194206A. 1982.11.29.
33. Method of producing ultra-low-carbon steel: patent EP0461415B1. 10.01.1996 Bulletin 1996/02
34. Emi T. Steelmaking technology for the Last 100 years: Toward highly efficient mass-production systems for high-quality steels. *Tetsu-to-Hagane*. 2014. Vol. 100(1), P. 31 – 58
35. Kitagawa N., Osanai H., Suito M., Ohmiya S., Kato Y., Takahashi Y. Development of Refining Process for Production of High Purity Ultra-low-carbon Steel. *Tetsu-to-Hagane*. 1990. Vol. 76(11), P. 1932 – 1939
36. S. Production of low-carbon steel: patent JPH01259113A. 1989.10.16
37. Supersonic coherent gas jet for providing gas into a liquid: patent EP0965649A1. 22.12.1999 Bulletin 1999/51
38. Coherent jet system with single ring flame envelope: patent US 6604937 B1. Aug. 12, 2003
39. Apparatus for electric steelmaking: patent US 5714113.1998-02-03.
40. Krivsky W. A. The linde argon-oxygen process for stainless steel; A case study of major innovation in a basic industry. *Metallurgical Transactions*. 1973. Vol. 4 (6), P. 1439
41. Method for smelting very-low carbon and high silicon stainless steel by AOD: patent CN101338396A. 2009.01.07
42. The Making, Shaping and Treating of Steel, 11th Edition, The AISE Steel foundation, 1998.
43. Staundinger G., Muller J. Design aspects of an ideal oxygen steelmaking converter. *Iron & Steel Technology*. 2004. Jan., P.45
44. Asai S. and Szekely K. Decarburization of stainless steel. *Metallurgical Transactions*. 1974. Vol. 5, No. 3. P. 651 – 657

45. Göernerup M. and Sjöberg P. AOD/CLU process modelling: optimum mixed reductant addition. *Ironmaking and Steelmaking*. 1999. No. 26, P. 58 – 63
46. Wei J.-H. and Zhu D.-P. Mathematical modelling of the argon-oxygen decarburization refining process of stainless steel: Part I. Mathematical model of the process. *Metallurgical and materials transactions B*. 2002. Vol. 33B, P. 111 – 119.
47. Wei J.-H. and Zhu D.-P. Mathematical modelling of the argon-oxygen decarburization refining process of stainless steel: Part II. Application of the model to industrial practice. *Metallurgical and materials transactions B*. 2002. Vol. 33B, P. 121 – 127.
48. Нефедов Ю. А., Рабинович А. В., Садовник Ю. В. Разработка и промышленное освоение технологии выплавки коррозионностойких сталей методом газокислородного рафинирования (ГКР). *Современные проблемы металлургии. Днепрпетровск: Системные технологии*. 1999, С.112-132
49. Нефедов Ю. А., Садовник Ю. В., Ян Ху. Инновационная технология производства коррозионностойких сталей методом кислородного рафинирования (ГКР) внедренная на отечественных и китайских предприятиях. *Сучасна металургія: проблеми та рішення* : зб. доповідей і тези Міжнародної наук.-практ. конф. 9-11 грудня 2015 р., Дніпропетровськ, Україна. 2015. С.210 – 213.
50. Нефедов Ю. А., Садовник Ю. В., Лысаков А. В. 25 лет спустя. *Металлургическая горнорудная промышленность*. 2013. №1, С. 21 – 22.
51. Каплан В. Н., Вакула В. С., Садовник Ю. В., Ян Х. Внедрение автоматизированных технологических комплексов конвертеров ГКР для производства коррозионностойких сталей на металлургических предприятиях КНР. *Металл и литье Украины*. 2009. №1–2, С.41 – 42.
52. Kraft V. V. Effect of vacuum annealing on decarburizing of low-carbon steel. *Metal Science and Heat Treatment*. 1971. Vol.13(8), P. 684 – 687

53. Yamaguchi K., Kishimoto Y., Takeuchi S., Fujii T., Kuga M. Development of decarburization technology for ultra-low carbon steel using RH hydrogen injection method. *J-STAGE Top Material*. 1994. Vol. 33, No. 5. P. 622 – 624
54. Chanda P., Mahashabde V., Khullar A., Sinha S. Production of ultra low-carbon steel by improving process control at RH degasser. Conference: *AISTech*, May 2017, Vol. I. 2017.
55. Kato Y., Kirihara T., Fujii T. Analysis of decarburization reaction in RH degasser and its application to ultra-low carbon steel production. Kawasaki Steel Technical Report, 1995. P. 25 – 32
56. Yamaguchi K., Kishimoto Y., Sakuraya T., Nishikawa H. Effect of refining conditions for ultra low carbon steel on decarburization reaction in RH degasser. *ISIJ International*. 1992. Vol. 32(1), P. 126 – 135
57. Production of molten extra low carbon steel: patent JPS57194206A. 1982.11.29
58. Verfahren zum Herstellen kohlenstoffarmer Stähle: patent EP0461415B1. 1996.01.10
59. H. Matsuno: *Bull. Iron Steel Inst. Jpn.* 2005. Vol.10, 260 p.
60. Шаповалов В. О., Біктагіров Ф. К., Могилатенко В. Г. Позапічне оброблення сталі: способи, процеси, технології. К.: Хімджест, 2023. 360 с.
61. Toirov O., Tursunov N., Alimukhamedov S. and Kuchkorov L. Improvement of the out-of-furnace steel treatment technology for improving its mechanical properties. IV International Scientific Conference “Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering” (CONMECHYDRO - 2022). 2023.Vol. 365.
62. Kumakura M. Advances in Steel Refining Technology and Future Prospects. Nippon steel technical report. No. 104, 2013.
63. Özdeş G., Kutlu Y. Process analysis in production of desired quality steel in ladle furnaces in iron and steel industry. *Akıllı Sistemler ve Uygulamaları Dergisi* (Journal of Intelligent Systems with Applications), 2020. Vol. 3(2). P. 118-121

64. Peaslee K. D. et al. Efficiency in Steel Melting: Ladle Development. Proceedings of the 59th SFSA Technical and Operating Conference, Steel Founders' Society of America (SFSA), Jan 2005.
65. Guo D. & Irons G. A. Modeling of gas-liquid reactions in ladle metallurgy: Part I. Physical modeling. Metallurgical and Materials Transactions B, 2000. Vol. 31, P. 1447–1455
66. Guo D. & Irons G. A. Modeling of gas-liquid reactions in ladle metallurgy: Part II. Numerical simulation. Metallurgical and Materials Transactions B, 2000. Vol.31. P. 1457–1464
67. Mincu V., Negru M, Constantin N. Increase the Ingots Quality Cast in Vacuum. Solid State Phenomena, 2012. Vol.188. P. 339-345
68. Mincu V., Constantin N. Influence of vacuum on the quality steels. Editura Academiei Oamenilor de Știință București, 2011. Vol. 3, Iss. 4. P.211 – 221.
69. Suzuki T., Asakuma T. Special Features of Vacuum Ingot-Casting Process: Comparison of vacuum and air-cast steel-I. Tetsu-to-Hagane, 1959. Vol. 45(8). P.793-799.
70. Levaux J., Hannon L. Vacuum casting of steel. Vacuum, 1960. Vol. 10(6). P. 435–443
71. Issagulov A., Kovalev P., Melnik S., Kulikov V., Kvon S. and Arinova S. The effect of complex extra-furnace treatment of metal melts on the formation of non-metallic inclusions in large-sized ingots. Materials Research Express, Vol.11, Num. 11. P. 116502
72. Molchanov L. S., Piptyuk V. P., Grekov S. V. Feasibility of developing steel vacuuming technology at "Kametstal" PJSC. Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy, 2023. Vol. 37. P. 220-230
73. Magaon M., Radu M., Serban S., Zgripcea L. Research regarding the vacuuming of liquid steel on steel degassing. IOP Conference series materials science and engineering, 2018. Vol. 294(1). P.012005

74. Wang M., Guo J., Li X., Yao Ch., Bao Y. Effect of oxidizing slag on the decarburization of ultra-low-carbon steel during the ruhrstahl-heraeus vacuum process . *Vacuum*, 2021. Vol. 185. P. 109984
75. Wang X., Liu Y., Li G., Wang Q., Li T., Cao Y. Effect of Ce_2O_3 on the fluoride vaporization of $\text{CaF}_2\text{--CaO--Al}_2\text{O}_3\text{--}(\text{Ce}_2\text{O}_3)$ slag used for vacuum electroslag remelting . *Vacuum*, 2021. Vol. 185. P. 109997
76. Liu Y., Wang X., Li G., Huang X., Wang Q., Li B. Cleanliness improvement and microstructure refinement of ingot processed by vacuum electroslag remelting. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020. Vol. 9, Iss. 2. P. 1619-1630
77. Liu Y., Wang X., Li G., Zhang Z., Li B. Role of vacuum on cleanliness improvement of steel during electroslag remelting. *Vacuum*, 2018. Vol. 154 . P. 351-358
78. Choi H.-S., Seo S., Choi J.-H., Kim K.-C. Cleans steel production technology for ultra low carbon steel. *SEAFISI*. 2008. Vol 37(1), P. 52 – 56
79. Sarkar R. Critical issues in steel ladle bottom purging: innovative technical approaches. Conference: 8th India International Refractories CongressAt: Kolkata, India. February 2010.
80. Zhang L., Thomas B.G., Wang X., Cai K. Evaluation and Control of Steel Cleanliness—Review. In *Proceedings of the 85th Steelmaking Conference Proceedings*, ISS-AIME, Warrendale, PA, USA, 10–13 March 2002; Vol. 85. P. 431–452
81. Merder T., Warzecha P., Pieprzyca J., Warzecha M., Wende R. and Hutny A. Model Investigation of Argon Injection into Liquid Steel at Ladle Furnace Station with Using of Innovative Module. *Materials*, 2023. Vol. 16(24). P. 7698
82. Kurilova L. Ya., Zakharov S. A., Vydrina Zh. A., Muratov A. A., Shevtsov A. L., Visloguzova É. A. & Chervyakov B. D. Porous forsterite parts for purging of metal with inert gases. *Refractories*, 1987. Vol. 28. P. 348–349
83. Feng W.-X., Chen W.-Q., Zhao J.-Z. Inclusions removal in a tundish with argon purging . *Journal of University of Science and Technology Beijing*. 2010. Vol. 32(4). P.425-431

84. Campos M. B., Peixoto J. J. M., da Silva C. A. Comparative study of inclusion removal from liquid steel in the RH and argon purging processes. *International Engineering Journal*, 2020. Vol. 73(3). P. 353-359
85. Zhang L.F., Taniguchi S. Fundamentals of inclusion removal from liquid steel by bubble flotation. *International Materials Reviews*, 2000. Vol. 45(2). P.59-82
86. Mazumdar D., Guthrie R. The physical and mathematical modelling of gas stirred ladle systems. *ISIJ International*, 1995. Vol. 35(1). P.1–20
87. Mazumdar D., Kim H.B., Guthrie R.I.L. Modelling criteria for flow simulation in gas stirred ladles: experimental study. *Ironmaking & Steelmaking Processes, Products and Applications*, 2000. Vol. 27. Iss.4. P. 302- 309
88. Haojian D., Zhang L., Thomas B. G., Conejo A. Fluid flow, dissolution, and mixing phenomena in argon-stirred steel ladles. *Metallurgical and material transaction B*, 2018. Vol. 49(5). P. 2722-2743
89. Пиптюк В.П., Самохвалов С.Е., Поляков В.Ф., Крикент И.В., Греков С.В., Буршитин В.А. Особенности массопереноса в ванне ёмкостью 140т установки ковш-печь постоянного тока. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*, 2012. №25. С. 131-138
90. Крикент И. В., Самохвалов С. Е., Кабаков Д. Ю., Кривцун И. В., Демченко В. Ф., Пиптюк В. П., Греков С. В. Численное исследование гидродинамики расплава в установке ковш-печь постоянного тока. *Электromеталлургия стали и ферросплавов*. 2014. №. 3. С. 45- 49
91. Пиптюк В.П., Самохвалов С.Е., Поляков В.Ф. и др. Численное исследование режимов комбинированной продувки на установке ковш-печь большой мощности. *Сучасні проблеми металургії*, 2011. №14. С. 78-84
92. Костецкий Ю.В., Мач А.В., Прокофьев В.В. Численное моделирование движения жидкого металла в ковше при одновременной продувке через погружную и донную фурму. *Наукові праці ДонНТУ. Металургія*. 2010. №12 (177). С. 120 – 129

93. Смірнов О.М., Сафонов В.М., Проскурєнко Д.В., Пісмарьов К.Є. Особливості перемішування сталі і шлаку в ковші під час продувки аргоном. *Металознавство та обробка металів*, 2009. № 3. С. 25-31.
94. Ошовская Е.В., Салмаш И.Н., Минтус А.Н., Цупрун А.Ю., Денисенко Д.А., Штепан Е.В. Моделирование процесса перемешивания расплава в сталеразливочном ковше с двумя продувочными отверстиями. *Металл и литье Украины*. 2006. № 1. С. 62-64
95. Смирнов А.Н., Ошовская Е.В., Салмаш И.Н. и др. Физическое моделирование процессов перемешивания металла газом в ковше. *Металл и литье Украины*, 2006. №3-4. С. 27-30
96. Aksel'rod L. M. Corundum-graphite stopper-monoblocks for continuous casting machines. *Refractories and Industrial Ceramics*. 1991. Vol. 32(9):. P. 87-493
97. Kochergina L. R., Shevchenko S. V. & Sarychev B. A. Structural Influence of Blow-Through Tuyeres on Their Efficiency in the Bottom Blowing of Metal in Steel-Teeming Ladles of Oxygen Converter Shop. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2022. Vol. 63. P. 5–8
98. Huang Ao, Gu H.Z., Wang N., Zhang M. Mathematical and physical modelling of purging plugs and its application for refining ladles. *Interceram - International Ceramic Review*, 2012. Vol. 2. P. 96-102
99. Huang Ao, Gu H. & Wang N. Water Modelling of the Blowing Effect in Ladles with Purging Plugs of Different Slit Structure and Distribution. *Interceram - International Ceramic Review*, 2014. Vol. 63. P.109–112
100. Egorov I. V. & Matvienko A. S. Experience of the manufacture and operation of blowing plugs (lances) produced by ООО Keralit. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2009. Vol. 50. P. 415–418
101. Koukkari P., Pajarre R., and Hack K. Constrained Gibbs energy minimisation. *International Journal of Materials*. 2007. vol.98 (10). P. 926–934.
102. . Koukkari P., Penttilä K., and Keegel M. Coupled Thermodynamic and Kinetic Models for High-Temperature Processes. *Proceedings of the 10th*

International IUPAC Conference on High Temperature Materials Chemistry, Part I, Forschungszentrum Julich. 2000. P. 253–256.

103. Lele A.B. & Dutta S.K. Metallurgical Thermodynamics Kinetics and Numericals. S Chand Publishing. 2012. 200 p.

104. Upadhyaya G. S., Dube R. K. Problems in Metallurgical Thermodynamics and Kinetics: International Series on Materials Science and Technology. Pergamon. 1977. 270 p. ISBN0080208649

105. Shamsuddin M. Physical Chemistry Of Metallurgical Processes. John Wiley & Sons, Inc. 2016.

106. Rao Y. K. Stoichiometry and Thermodynamics of Metallurgical Processes. 2 Volume. Cambridge University Press. 2009. 1013 p.

107. Голуб Т.С., Арендач Н.А. Термодинамічне дослідження процесів окислення домішок розплаву Fe-C за рахунок взаємодії з бульбашкою системи «нейтральний газ - кисень». Металл та лиття України, 2024. № 3-4, С. 50-61.

108. Вихлевщук В. А., Харахулах В. С., Бродский С. С. Ковшевая доводка стали. Днепропетровск: Системные технологии, 2000. 190 с.

109. Kneis L., Trummer B. and Knabl B. The hybrid plug – an innovative purging plug for steel ladles. *RHI Bulletin*. 2004. No. 1, P. 34 – 38.

110. Nag M., Agrawal T., Nag B., Singh B., Biswas S. Study and post mortem analysis of steel ladle porous plug to improve bottom purging efficiency for cleaner steel. *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol.101, P. 447 – 455

111. Ladle purging refractory. URL: <https://www.zircal.it/en/ladle-purging-refractory.html>

112. Яковлев Ю. Н., Камкина Л. В. Физико-химическое подобие металлургических процессов. *Сборник научных трудов Государственной металлургической академии Украины «Современные проблемы металлургии»*. 1999. Вып. 1, С. 90 – 100.

113. Гресс О. В., Стороженко С. А. Комплексные исследования гидродинамики металлической ванны в литейных ковшах / Вісник Донбаської державної машинобудівної академії, 2011. - № 4 (25). – С. 50-55.
114. Zhiwei Li, Wei Ouyang, Zhongliang Wang, Ruixuan Zheng, Yanping Bao, Chao Gu Physical simulation study on flow field characteristics of molten steel in 70t ladle bottom argon blowing process/MDPI Metals, 2023. -№ 13(639). – P. 1-14.
115. Молчанов Л. С., Шеремета Н. А., Синегін Є. В. Дослідження ефективності гомогенізації рідкої сталі при продувці через блоки різної конструкції. *Теорія і практика металургії*. 2018. № 6, С. 76 – 80.
116. Molchanov L., Arendach N., Synehin Y. Study of the designs of bottom blowing devices for oxidative blowing in teeming ladles. *Сучасні проблеми металургії*. 2021. № 24, С. 81 – 89
117. Патент України на корисну модель 126453. Опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12.
118. Молчанов Л.С., *Арендач Н.А.*, Голуб Т.С. Лабораторне дослідження особливості змішування газових струменів технологічних газів. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2025. Вип. 39. С. 222-231
119. Modelling criteria for flow simulation in gas stirred ladles: experimental study/ D. Mazumdar, H.B. Kim, R.I.L. Guthrie// Ironmaking&Steelmaking Processes, Productsand Applications.-2000.- Volume 27.- Issue 4.- P. 302-309
120. Effect of Gas Blown Modes on Mixing Phenomena in a Bottom Stirring Ladle with Dual Plugs/ H.Y. Tang, X.C. Guo, G.H. Wu, and Y. Wang// ISIJ Int., 2016, vol. 56, pp. 2161-2170.
121. Некоторые вопросы оценки интенсивности перемешивания при продувке металла в ковше инертным газом. Сообщение 2 / А.Н. Смирнов, Е.В. Ошовская, И.Н. Салмаш [и др.] // Процессы литья. – 2008. – № 5. – С. 30–35.

122. Optimization of the bottom tuyeres configuration for the BOF vessel using physical and mathematical modeling/ Singh V., Kumar J, Bhanu C., Ajmani S.K., Dash S.K.// ISIJ Int., 2007.-v. 47(11).-P. 1605-1612
123. Effect of differential flow schemes on gas-liquid flow and liquid phase mixing in a Basic Oxygen Furnace/ Quiyoom A., Golani R., Singh V., Buwa V.V.// Chem.Eng.Sci., 2017.-v.73(9).-P.373-377
124. Математична модель гідродинаміки процесу продувки шлакової ванни у порожнині конвертера / А.Г. Чернятевич, О.С. Самохвалов, Є.М. Сігарьов, О.А. Чубіна // Математичне моделювання. - 2005. - №1(13). - С. 76-78,
125. A phase-field model for liquid-gas mixtures: mathematical modelling and discontinuous Galerkin discretization/ Repossi E., Rosso R., Verani M.// Modeling and scientific computing, 2016, v 27, P. 1-36.
126. Dynamic Model of Slag Foaming in Oxygen Steelmaking Converters/ ParetoshMisra, Brahma Deo,Raj Chhabra //ISIJ International, 1998.-v.38(11).-P.1225-1232
127. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 522 с
128. Молчанов Л.С., Голуб Т. С., Арендач Н.А. Комплексне дослідження особливостей перебігу окислення вуглецю в стальковші при донному бульбашковому продуванні сумішшю газів системи "кисень - нейтральний газ". Збірник наукових праць ДДТУ. Технічні науки. Вип. 2. С. 19-28
129. Арендач Н.А., Молчанов Л.С. Аналіз ефективності видалення вуглецю з розплаву на різних етапах виробництва сталі. Збірник праць IV Всеукраїнської науково-технічної конференції «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ 2023», 14-16 листопада 2023, С.7
130. Adam Cwudzin'ski Influence of flow control devices on mixing phenomena in the ladle with top lance stirring system—numerical and physical modeling /MDPI Metals, 2023. -№ 17(6130). – P. 1-18.

131. Rodolfo D. Morales, Fabia' N Andre' S Caldero' N-Hurtado, Kinnor Chattopdhyay, and Sergio Javier Guarneros Physical and mathematical modeling of flow structures of liquid steel in ladle stirring operations / The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International , 2020. – №6. – P. 27-31.
132. Eshwar Kumar Ramasetti, Ville-Valtteri Visuri, Petri Sulasalmi, Riku Mattila, Timo Fabritius Modeling of the effect of the gas flow rate on the fluid flow and open-eye formation in a water model of a steelmaking ladle / Steel research int, 2018. - №1800365. – P. 1 - 15
133. Голуб Т. С., Молчанов Л.С., Арендач Н.А. Процес окислення вуглецю при виробництві сталі за рахунок продувки сумішшю технологічних газів системи «кисень – нейтральний газ», як запорука ресурсозбереження. Збірник матеріалів науково технічної конференції «Сталий розвиток: Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування.» 16-18 жовтня, Львів, 2024. С. 185
134. Молчанов Л.С., Голуб Т. С., Арендач Н.А. Оцінка поведінки домішок при продувці металеві ванни сумішшю кисень – нейтральний газ через донний продувний блок. Збірник праць V Всеукраїнської науково-технічної конференції «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ 2024», 19-20 листопада 2024

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ АРЕНДАЧ НАТАЛІ АНАТОЛІЇВНИ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертаційного дослідження:

Статті у наукових фахових виданнях:

1. Молчанов Л.С., **Шеремета Н.А.**, Синегін Є.В. Дослідження ефективності гомогенізації рідкої сталі при продувці через блоки різної конструкції. *Теорія і практика металургії*. 2018. №6. С. 76-80.
<https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.10>
2. Molchanov L., **Arendach N.**, Synehin Y. Study of the design of bottom blowing devices for oxidative blowing in teeming ladles. *Сучасні проблеми металургії*. 2021. № 24. С. 81-89.
<https://doi.org/10.34185/1991-7848.2021.01.08>
3. Молчанов Л.С., Голуб Т.С., **Арендач Н.А.** Комплексне дослідження особливостей перебігу окиснення вуглецю в стальковшії при донному бульбашковому продуванні сумішшю газів системи «кисень — нейтральний газ». *Збірник наукових праць ДДТУ Технічні науки*. 2024. Вип..2. С. 19-28
<https://doi.org/10.31319/2519-2884.45.2024.2>
4. Голуб Т.С., **Арендач Н.А.** Термодинамічне дослідження процесів окислення домішок розплаву Fe-C за рахунок взаємодії з бульбашкою системи «нейтральний газ — кисень». *Металл та лиття України*. 2024. Вип. 32. № 3-4. С. 50-61.
<https://doi.org/10.15407/steelcast2024.03-04.007>
5. Молчанов Л.С., **Арендач Н.А.**, Голуб Т.С. Лабораторне дослідження особливості змішування газових струменів технологічних газів. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2025. Вип. 39. С. 222-231
<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38>

Патенти України на корисну модель:

6. Вогнетривкий блок для продувки металу газами. Патент України на корисну модель № 126453 **Шеремета Н.А.**, Молчанов Л.С., Бойченко Б.М., Нізяєв К.Г., Стоянов О.М., Синегін Є.В., Лантух О.С., Цибулько В.С. МПК7 C21 C5/48, заявл. 26.12.2017, власник НМетАУ; опубл.25.06.2018, Бюл. № 12. 6с.

<https://iprop-ua.com/inv/pdf/d4hqohtu-pub-description.pdf>

Тези доповідей міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференцій:

7. Донний блок для продувки розплаву сумішшю технологічних газів різного складу / **Н.А. Шеремета**, Б.М. Бойченко, К.Г. Нізяєв, О.М. Стоянов, Л.С. Молчанов, Є.В. Синегін // Литьє. Metallurgia-2018: Матеріали VII Международной научно-практической конференции. Запорожье, 22-24 мая 2018 г.– Запорожье, 2018. – С. 324-325.

https://nmetau.edu.ua/file/litvo__metallurgiya_2018.pdf

8. **Арендач Н.А.**, Молчанов Л.С., Синегін Є.В. Дослідження ефективності масообмінних процесів при продувці розплаву у сталерозливному ковші / Тези доповідей всеукраїнська науково-технічна конференція «Наука і металургія» присвячена 80-річчю Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України. Дніпро, 9-10 жовтня 2019 р. – Дніпро, 2019. – С. 20.

https://isi.gov.ua/wp-content/uploads/2020/01/sc_and_met_2019.pdf

9. Визначення впливу конструктивних параметрів донного продувального блоку на ефективність процесів гомогенізації розплаву / Л.С. Молчанов, Н.А. Арендач, Є.В. Синегін // Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні імені професора Михальова О.І.» Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. Дніпро, 17 – 19 березня 2020 р. – Дніпро, 2020. – Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні імені професора Михальова О.І.: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 17-19 березня, 2020. – С. 48 - 50.

<https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/itmm/article/view/237/146>

10. Математичне моделювання фізикохімічних процесів металургійного виробництва / Л.С. Молчанов, Є.В. Синегін, **Н.А. Арендач** // Всеукраїнська науково-методична конференція «Проблеми математичного моделювання»: Матеріали всеукраїнської науково-методичної конференції. Кам'янське, 27 – 28 травня 2020 р. – Кам'янське, 2020. – Проблеми математичного моделювання: Матеріали всеукраїнської науково-методичної конференції, 27-28 травня, 2020. – С. 14 - 15.

https://www.dstu.dp.ua/uni/downloads/material_konf_traven_%202020.pdf

11. **N. Arendach**, L. Molchanov, Y. Synehin, I. Mamuzić Carbon removal from steel by oxidation blowing in teeming ladle / SHMD – 2020. – P. 433.

<https://hrcak.srce.hr/file/344226>

12. Напрями вдосконалення технології виробництва низько вуглецевих розплавів / **Н.А. Арендач**, Л.С. Молчанов, Є.В. Синегін // Литво. Металургія-2020: Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції. Запоріжжя, 8-10 вересня 2020 р.– Запоріжжя, 2020. – С. 196-197.

https://nmetau.edu.ua/file/lite._metallurgiya.2020.pdf

13. Various bottom blowing devices for oxidative blowing / L. Molchanov, **N. Arendach**, Y. Synehin // Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні»: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. Дніпро, 16 – 18 березня 2021 р. – Дніпро, 2021. – Інформаційні технології в металургії та: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 16-18 березня, 2021. – С. 41 - 44.

<https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/itmm/article/view/648/525>

14. Розробка режимів окислювальної продувки залізовуглецевих розплавів сумішшю інертний газ – кисень у сталерозливному ковші / **Арендач Н.А.**, Молчанов Л.С., Синегін Є.В. // Литво. Металургія-2021: Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції. Запоріжжя, 18-20 травня 2021 р.– Запоріжжя, 2021. – С. 255 - 256.

https://nmetau.edu.ua/file/lite._metallurgiya._2021.pdf

15. Аналіз ефективності видалення вуглецю з розплаву на різних етапах виробництва сталі / Арендач Н.А., Молчанов Л.С. // IV Всеукраїнська науково-технічна конференція «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ 2023», 14-16 листопада 2023 р. – С. 7.

<https://crust.ust.edu.ua/server/api/core/bitstreams/6da1d195-ccc7-4fbf-9e89-d8f42fd1ca29/content>