

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

**КОМАРОВ ВАСИЛЬ ФЕДОРОВИЧ**

УДК 669.18:621.746:532.543.7:66.067.8

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ВИДАЛЕННЯ НЕМЕТАЛІЧНИХ  
ВКЛЮЧЕНЬ ВПЛИВОМ НА ПРОЦЕСИ ПЕРЕНОСУ В РОЗПЛАВІ  
У ПОРОЖНИНІ ПРОМІЖНОГО КОВША**

Спеціальність – 05.16.02 «Металургія чорних і кольорових  
металів та спеціальних сплавів»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Донецькому національному університеті імені Василя Стуса Міністерства освіти і науки України у місті Вінниця.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**КРИЖАНОВСЬКИЙ Володимир Григорович**  
завідувач кафедри радіофізики та кібербезпеки  
Донецького національного університету  
імені Василя Стуса, м. Вінниця

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент  
**КОСТЕЦЬКИЙ Юрій Віталійович**, завідувач  
кафедри фізико-хімічних основ технології  
металів Інституту матеріалознавства та  
зварювання Національного технічного  
університету України «Київський  
політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського», м. Київ

кандидат технічних наук, доцент  
**ГЕРАСИМЕНКО Віктор Григорович**,  
старший науковий співробітник Інституту  
чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН  
України, м. Дніпро

Захист відбудеться «27» квітня 2021р. о 11-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.03 Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

Автореферат розісланий «22» березня 2021р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 08.084.03  
доктор технічних наук, професор  
lydmila\_kamkina@ukr.net

Камкіна Л. В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Дисертаційна робота присвячена математичному моделюванню гідрогазодинамічних, теплофізичних і масообмінних процесів, що мають місце в процесі видалення неметалічних включень (НВ) в технології рафінування рідкого металу в проміжному ковші (ПК) машин безперервного розливання заготовок (МБРЗ). До числа основних завдань сучасної металургії відноситься розробка і впровадження нових технологій, спрямованих на досягнення високої чистоти від неметалічних включень в листовому прокаті, що отримується з безперервнолитих слябів при мінімальних енерго- і ресурсовитратах. Ключовим агрегатом машин безперервного розливання заготовок, в якому ще можливе проведення операцій по зниженню забрудненості металу неметалічними включеннями, служить проміжний ківш. Одним із відомих способів рафінування сталі від неметалічних включень є використання секціонованих проміжних ковшів з каналами в розділових перегородках, які також інколи використовується в поєднанні з продувкою металу інертним газом через каналні фурми.

Незважаючи на численні дослідження, присвячені аналізу процесів видалення неметалічних включень, до теперішнього часу остаточно не існує однозначно встановлених оптимальних умов рафінування сталі від неметалічних включень в проміжному ковші МБРЗ. Внаслідок цього вибір конструктивних параметрів проміжних ковшів і умов продувки інертним газом носить переважно емпіричний характер. Кількісні оцінки зміни розподілу неметалічних включень в ході рафінування сталі вельми нечисленні.

У зв'язку з цим дослідження гідродинаміки течій розплаву в ванні проміжного ковша, вибір раціональних конструктивних параметрів перегородок та їх наявності, конструктивних параметрів каналних протяжних фурм, відпрацювання режимів продувки аргоном і кількісна оцінка впливу зазначених процесів на результати рафінування сталі від неметалічних включень при безперервній розливці є актуальною науковою задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі фізики нерівноважних процесів, метрології та екології і (надалі) на кафедрі радіофізики та кібербезпеки Донецького національного університету імені Василя Стуса. Науково-дослідна робота велася відповідно до пріоритетного науково-технічного напрямку «Екологічно чиста енергетика та ресурсозберігаючі технології» та науково-технічної програми «Пріоритетні напрями розвитку науки і техніки України».

Дисертаційна робота пов'язана з держбюджетними темами, які виконувалися в Донецькому національному університеті імені Василя Стуса, і являє собою узагальнення наукових результатів, які отримано автором за період з 2001 р. по 2014 р. Здобувач є виконавцем держбюджетних тем:

- 01-1вв/26 (номер держреєстрації 0101U005373) «Моделювання гідродинамічних та тепломасообмінних процесів в проміжному ковші»;

- 04-1вв/26 (номер держреєстрації 0104U002157) «Чисельне моделювання гідродинамічних і теплофізичних процесів в проміжних ковшах різної конфігурації»;
- 07-1вв/26 (номер держреєстрації 0107U001466) «Математичне моделювання гідродинамічних та тепломасообмінних процесів при обробці металу в проміжному ковші»;
- 12-1вв/26 (номер держреєстрації 0112U002699) «Енергозбереження при розливці сталі».

**Мета роботи:** Метою даної дисертаційної роботи є розробка на основі встановлених гідрогазодинамічних закономірностей і сформульованого механізму видалення неметалічних включень технології рафінування рідкого металу в проміжному ковші МБРЗ для отримання листового прокату з низьколегованих сталей відповідального призначення.

Для досягнення поставленої мети передбачається вирішення наступних завдань:

- розробити параметри проміжних ковшів слябових МБРЗ, що забезпечують ефективне виведення неметалічних включень до межі розділу «метал – шлак» завдяки створенню спрямованих гідродинамічних потоків рідкого металу;
- визначити методами фізичного та математичного моделювання якісні та кількісні характеристики структури течій в проміжному ковші МБРЗ при різних режимах розливання;
- дослідити особливості формування газорідних течій при донній продувці інертним газом з метою встановлення оптимальних технологічних параметрів продувки;
- вивчити властивості взаємодії газових і циркуляційних течій, визначити вплив основних гідрогазодинамічних факторів на ефективність видалення неметалічних включень при рафінуванні рідкої сталі в проміжному ковші МБРЗ;
- розробити комплексну технологію рафінування металу від неметалічних включень в проміжному ковші слябової МБРЗ із застосуванням оптимізованої конфігурації, донних канальних фурм для продувки металу аргонном, пристроїв для зниження циркуляції поблизу випускного стакану проміжного ковша;
- визначити вплив розробленої нової технології безперервного рафінування сталей в проміжному ковші МБРЗ на забрудненість рідкого, литого і катаного металу НВ різного виду та розміру.

**Об'єкт дослідження:** гідрогазодинамічні, теплофізичні та масообмінні процеси, що мають місце в процесі видалення неметалічних включень в технології рафінування рідкого металу в проміжному ковші машин безперервного лиття заготовок.

**Предмет дослідження:** конструктивні параметри перегородок, інших вбудованих елементів та канальних протяжних фурм, геометрія проміжних ковшів, режими продувки інертним газом, кількісні оцінки впливу процесів, що є об'єктом дослідження, на результати рафінування сталі в проміжному ковші,

оптимальні умови рафінування сталі від неметалічних включень в проміжному ковші МБРЗ.

**Методи дослідження.** При виконанні роботи використовувалися фундаментальні положення теорії теплообміну, теплопровідності, гідро- та газодинаміки, термодинаміки, фізики нерівноважних процесів та технології ливарного виробництва. Використовувалися методи математичного аналізу і моделювання, чисельні методи розв'язання диференціальних рівнянь з окремими похідними (методи скінчених різниць та скінчених елементів) для рішення завдань гідроаеромеханіки, тепло- та масообміну. Обумовлені залежності були отримані на основі фізичних законів з урахуванням теорії подібності та розмірностей, що забезпечує їх використання в широкому діапазоні умов експлуатації.

Обчислювальні експерименти з дослідження теплофізичних і гідродинамічних процесів проводилися на персональних комп'ютерах.

Експериментальні дослідження, що виконані в умовах ФТІМС НАНУ та ПАТ МК «Азовсталь», проведені з використанням методу планування експерименту і сертифікованих засобів контролю якості продукції. Лабораторні дослідження проведені з використанням засобів експериментальної механіки, а при обробці результатів застосовані методи математичної статистики та спектрального аналізу.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1) Отримав подальший розвиток метод моделювання процесів переносу в проміжному ковші на основі теорії суцільних середовищ шляхом врахування бульбашкового режиму продувки через інжекцію газової фази безпосередньо в об'єм розплаву в околі продувного блоку та використання еквівалентних ефективних перетинів для граничних умов на ділянках надходження та витоку сталі. Це дозволило виконати моделювання в усьому діапазоні досліджуваних режимів продувки при непорушені умов наближення суцільного середовища, дотриманні необхідних витрат аргону та актуальної витрати металу через промковщ, і в результаті отримати нову інформацію про механічні аспекти теорії очищення металу від неметалічних включень з модельної задачі з ідеалізованою репрезентацією геометрії металургійного пристрою.

2) Отримана нова інформація з теорії струменевих течій, що розвиваються в обмеженому просторі завдяки запропонованому в роботі оригінальному методу виявлення характерних зон течії та обчисленню середньої величини кінетичної енергії, а також енергії турбулентного руху сукупно та по окремих зонах, що дозволяє оцінювати час перебування розплаву в проміжному ковші та приповерхневому шарі.

3) Уперше визначено параметри та залежність максимально припустимих режимів дії на розплав від комбінації інтенсивності циркуляції розплаву, ступеня його турбулізації та інтенсивності бульбашкової продувки в проміжному ковші через критерій інтенсивності процесів взаємодії розплаву з покривним шлаком, який враховує величини кінетичної енергії та енергії турбулентного руху в приповерхневому шарі розплаву. Це дозволяє забезпечити умови ефективної асиміляції неметалічних включень покривним

шлаком проміжного ковша при збереженні механічної стабільності межі «метал – шлак» та всього шлакового покриву і низькій ймовірності затягування шлаку в об'єм розплаву.

4) Отримали подальший розвиток підходи до дослідження фізичних процесів у замкнених об'ємах металургійних агрегатів, зокрема у проміжному ковші МБРЗ, завдяки запропонованому в роботі способу визначення параметричних моделей процесу на основі знання про характерні зони об'єму досліджуваного агрегату та їх інтегральні параметри, що визначаються з розв'язання рівнянь механіки суцільних середовищ. Побудовані у такий спосіб параметричні моделі на відміну від поширених підходів, що використовують ситуативне виокремлення ділянок металургійного агрегату (комірок ідеального змішування та витіснення), дають краще розуміння внутрішньої динаміки розплаву за конкретних умов, а також дозволяють досліджувати складні просторово-розвинені процеси, коли неможливо визначити розмежування зон поширеними на практиці способами.

#### **Практичне значення отриманих результатів:**

1) Розроблено унікальне програмне забезпечення для чисельного моделювання гідродинамічних потоків в приймальній секції проміжного ковша МБРЗ при перехідних режимах розливання (заміна проміжного ковша, перша і остання плавки в серії).

2) Виявлено закономірності впливу режимів продувки і параметрів багатоканальної поперечної донної фурми на формування газогідродинамічних потоків в проміжному ковші та вплив геометричних параметрів вбудованих елементів на структуру потоків металу в проміжному ковші МБРЗ в процесі обробки продувкою аргонном та без неї.

3) Виявлено поєднання режимів продувки, параметрів багатоканальної поперечної донної фурми і геометричних параметрів вбудованих елементів, а також параметрів розташування фурми та вбудованих елементів, що забезпечують формування режимів течії з зонами зворотної циркуляції, які надають позитивний ефект рафінуванню рідкого металу і гомогенності параметрів розплаву перед надходженням до кристалізаторів.

4) Застосування розробленої технології рафінування металу в проміжному ковші МБРЗ у вигляді визначеного у роботі поєднання режимів продувки, параметрів багатоканальної поперечної донної фурми і геометричних параметрів вбудованих елементів, а також параметрів розташування фурми та вбудованих елементів, що забезпечують формування необхідних режимів течії, має забезпечити ефективне зменшення загальної забрудненості литого металу від вторинних неметалічних включень в 2 рази з практично повним видаленням включень розміром понад 30 мк.

5) Складові технології перевірені в умовах ПАТ МК «Азовсталь» (м. Маріуполь) при безперервному литті слябів зі сталі категорій міцності Х60 і Х70 на експериментальному варіанті проміжного ковша, що був обладнаний дослідною донною фурмою з просторово орієнтованими каналами, що забезпечувала необхідний бульбашковий режим продувки. За результатами досліджень забрудненості безперервнолитих слябів загальний індекс

забрудненості на дослідному металі на 52% нижче, ніж на порівняльному; кількість включень розміром менше 10 мк в загальній масі включень становить на порівняльному металі – 43.9%, на дослідному металі – 68.9%; кількість включень розміром понад 30 мк в загальній масі включень становить на порівняльному металі – 29.0%, на дослідному металі – відсутні.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертація є самостійною роботою автора і базується на опублікованих результатах досліджень. Всі основні результати, що відображають сутність дисертаційної роботи і містяться в пунктах наукової новизни та практичного значення, отримані автором особисто або за його безпосередньої участі та досить повно викладені у наукових працях, опублікованих здобувачем самостійно [4, 7, 11, 14, 15] та у співавторстві. У працях, опублікованих у співавторстві, авторові належать: в [2] – побудова моделі, розробка та налагодження алгоритмів та програмного забезпечення, проведення обчислювальних експериментів та обробка результатів чисельного моделювання, в [3, 8, 16] – вибір математичних моделей та проведення обчислювальних експериментів, в [1, 10] – дослідження гідродинамічних чинників впливу та обґрунтування критеріїв інтенсифікації процесу асиміляції неметалічних включень шлаковим покриттям, у [12] – отримання вихідних даних для оцінки інтенсивності процесів рециркуляції розплаву, в [5, 13] – участь в обґрунтуванні оптимальних параметрів продувки аргоном та побудова відповідної математичної моделі гідрогазодинамічних процесів для подальшої оптимізації топології, проведення розрахунків, у [6] – побудова алгоритму та чисельне моделювання теплового стану в багатошаровій стінці металургійного агрегату при тривалому періодичному впливі розплаву, у монографії [9] – частина вмісту 1 та 2 глав, а також повний вміст 6 глави.

**Апробація матеріалів дисертації.** Матеріали дисертаційної роботи були представлені та обговорені на всеукраїнських та міжнародних наукових і науково-практичних конференціях: 12-й Міжнародний Конгрес сталеплавильників (м. Вика, 22–26 жовтня 2012 р.); XIV Minsk International Heat and Mass Transfer Forum (м. Мінськ, 10–13 вересня 2012 р.); VI Minsk International Heat and Mass Transfer Forum (м. Мінськ, 19–23 травня 2008 р.); II Промисловий Інвестиційний Форум, VIII міжнародна спеціалізована виставка-конференція «Литьє-2012» (м. Запоріжжя, травень 2012 р.); IV міжнародна конференція «Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу» (м. Дніпропетровськ, 1–3 листопада 2012 р.); XVI міжнародна конференція «Теплотехніка та енергетика в металургії» (м. Дніпропетровськ, 4–6 жовтня 2011 р.); міждержавна науково-методична конференція «Проблеми математичного моделювання» (м. Дніпродзержинськ, 2003, 2006, 2007, 2008, 2011 р.р.); міжнародний науково-практичний семінар «Повховські наукові читання» (м. Донецьк, 2010, 2012 р.р.); міжнародний науково-практичний семінар «Гідродинаміка та екологія» (м. Донецьк, 11–12 листопада 2009 р.); міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні технології в металургії сталі: XXI століття» (м. Донецьк, 21–23 вересня 2004 р.); міждержавна науково-методична конференція «Комп’ютерне моделювання» (м. Дніпродзержинськ, 2001, 2000 р.р.); науково-практична

конференція «Інноваційні технології позапічної обробки чавуну і сталі» (м. Донецьк, 25–26 жовтня 2011 р.); науково-практична конференція «50 років безперервного розливання сталі в Україні» (м. Донецьк, 4–5 листопада 2010 р.).

Результати дисертації неодноразово доповідалися на семінарах Донецького національного університету імені Василя Стуса.

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи викладені в 26 публікаціях, в тому числі: 1 монографія, 8 робіт в фахових виданнях, 7 статей у збірниках наукових праць тощо, 10 тез доповідей на науково-практичних та науково-методичних конференціях. В тому числі 6 статей опубліковано в наукових фахових виданнях, що відповідають переліку МОН України, 2 – у фахових закордонних наукових виданнях, що включені до наукометричної бази SCOPUS.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з вступу, 4-х розділів, висновків, списку використаних джерел з 131 найменування (з урахуванням публікацій автора) та додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 171 сторінку, з них 134 сторінки основного тексту, 47 рисунків, з них 24 на окремих сторінках, і 16 таблиць, з них 5 на окремих сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, необхідність розробки технології виробництва чистих сталей із застосуванням сучасного комплексу, що особливо важливо для випуску високовуглецевих сталей високої якості. Сформульовані мета і завдання дисертації, визначені об'єкт, предмет і методи дослідження, розкрита наукова новизна роботи та її практична значимість, відзначено особистий внесок здобувача та зв'язок роботи з науковими програмами та темами, наведена інформація щодо публікацій, запровадження основних результатів роботи, структури і обсягів дисертації.

**У першому розділі** «Стан проблеми і завдання дисертаційної роботи» наведено аналітичний огляд пов'язаних з темою роботи наявних досліджень та сучасного стану проблеми використання проміжного ковша, що є фінальною частиною виробничої лінії безперервного розливання, в якості агрегату безперервної дії, де можливе додаткове позапічне рафінування для видалення вторинних неметалічних включень та підвищення якості сталі, що розливається. В розділі виконано огляд особливостей конструкції ПК, пов'язаних з ним технологічних процесів і заходів, що вживаються під час проектування та експлуатації металургійного агрегату. Виявлено існуючі проблеми технології додаткової обробки сталі на стадії проміжного розподільного пристрою. Також у розділі проведено порівняльний аналіз поширених на практиці та використаних у наявних роботах за темою роботи підходів до дослідження, що залучають моделі фізичних процесів в проміжному промковші. Визначені їх недоліки та напрямки вдосконалення методу дослідження залученням інформації, що отримується при розв'язанні системи рівнянь механіки суцільних середовищ.

У другому розділі «Модель гідродинамічних, теплофізичних і масообмінних процесів у проміжному ковші» наведені результати дослідження щодо вибору параметрів і припустимого діапазону режимів дії на розплав, за яких не повинно спостерігатися прогнозованого погіршення умов роботи промковшу через надмірну турбулізацію або виникнення негативних явищ на межі розділу «метал – шлак». Визначено, що для забезпечення дослідного бульбашкового режиму продувки ванни проміжного ковша при дотриманні умов повного виведення з розплаву сукупного об'єму газової фази, що досягає межі «метал – шлак», через шар шлаку, діаметр бульбашок в момент досягнення шару шлаку повинен дорівнювати 10–11 мм, що може бути забезпечено, якщо в момент відриву від отворів продувального блоку діаметр бульбашок становитиме 4.7–5.2 мм. Такі умови продувки аргоном потребують фурму з підвідними каналами  $\varnothing$  1.3–1.7 мм. Діаметр підвідного каналу 1.7 мм гарантує здолання бульбашками шару покривного шлаку, що є запорукою підтримування всієї площі межі контакту шлаку з металом в активному для асиміляції неметалічних включень стані.

Це дозволило зробити певні припущення щодо моделювання і виконати вибір складових моделі, що охоплює процеси, які становлять об'єкт дослідження дисертаційної роботи для подальшої можливості дослідження сукупних процесів масообміну, гідродинаміки та гідрогазодинаміки в проміжному ковші МБРЗ при наявності продувки і різних режимах розливання та впливу зазначених факторів на перебіг видалення неметалічних включень на стадії перебування розплаву сталі в промковші.

Для опису процесів в розплаві поставлена модельна задача та побудована відповідна математична модель на основі диференціальних рівнянь конвекції-дифузії у наближенні Буссінеска (рівняння Нав'є-Стокса з осередненням за Рейнольдсом, рівняння нерозривності, рівняння для частки газової фази, рівняння теплопереносу, рівняння  $k$ - $\varepsilon$  моделі турбулентності для кінетичної енергії турбулентного руху і її дисипації):

$$\rho_{\text{еф}} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho_{\text{еф}} (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \rho_{\text{еф}} \vec{F} - \nabla p + \nabla \cdot \left[ \left( \eta + \frac{\eta_r}{\sigma_k} \right) \cdot \left[ \nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right] \right], \quad (1)$$

де  $\vec{F} = -\vec{g} - k_1 \vec{v}_r \beta - 2k_{\text{ст}}/b \cdot \vec{u}$ ;  $\vec{g}$  – сила, що діє на елементарний об'єм розплаву, залежить від його відносної ваги і обсягу залученої в рух з бульбашками приєднаної маси та враховує інерційний ефект бічних стінок;  $\rho_{\text{еф}} = \rho_m (1 - \beta) + \rho_r \beta$ ,  $\rho_m$ ,  $\rho_r$  – щільність досліджуваного середовища, рідини і газу, що вдмухується;  $\beta$  – об'ємна частка газової фази. Через незначний перепад температур розплаву ( $\sim 2$ – $3$  °C) на ділянці проміжних ковшів досліджуваних конфігурацій та інтенсивність змущеної конвекції згідно дослідженню впливом теплового розширення розплаву на гідродинаміку знехтувано.

$$\frac{\partial \rho_{\text{еф}}}{\partial t} + \text{div}(\rho_{\text{еф}} \cdot \vec{u}) = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} + (\vec{u}_r \cdot \nabla) \beta = R + \nabla (D_{\text{еф}} \nabla \beta), \quad (3)$$

де  $D_{\text{еф}}$  – коефіцієнт турбулентної дифузії аргону до розплаву;  $\vec{u}_r$  – швидкість руху газової фази, її вертикальна складова для даного рівняння  $v' = v + v_r$ ;  $v_r$  – відносна швидкість спливання бульбашок в рідкому середовищі (рис. 1),  $R$  – джерело газової фази в околі продувного блоку,  $R = \frac{q}{V_0} \frac{T_m}{273}$ ;  $q$  –

витрата газу через продувний блок;  $V_0$  – характерний об'єм зони формування барботажного потоку.

$$c_m \rho_{\text{еф}} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda_m \nabla T + c_m \rho_{\text{еф}} T \vec{u}) = Q, \quad (4)$$

де  $Q$  – джерело тепла, що враховує тепловтрати об'ємом розплаву через бічні стінки проміжного ковша,  $Q = 2q_{\text{бок}}/b$ ,  $b$  – усереднений поперечний перетин ПК.

$$\rho_{\text{еф}} \frac{\partial k}{\partial t} - \nabla \cdot \left( \left( \eta + \frac{\eta_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \rho_{\text{еф}} \vec{u} \cdot \nabla k = \frac{1}{2} \eta_T \left( \nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right)^2 - \rho_{\text{еф}} \varepsilon; \quad (5)$$

$$\rho_{\text{еф}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \nabla \cdot \left( \left( \eta + \frac{\eta_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + \rho_{\text{еф}} \vec{u} \cdot \nabla \varepsilon = \frac{1}{2} C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \eta_T \left( \nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right)^2 - \rho_{\text{еф}} C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (6)$$

Для розв'язання система рівнянь (1)–(6) доповнюються початковими і граничними умовами в системі «промковш – розплав – шлак».

У початковий момент часу ( $t_0$ ) передбачається відсутність потоків і однорідний розподіл температури розплаву, котра дорівнює температурі заливання ( $T_1 = 1818$  K). Значення тиску на всіх відкритих поверхнях в силу незначного перепаду по висоті ( $< 0.02$  %) в порівнянні з феростатичним тиском можна вважати однаковим і для зручності прийняти рівним 0:

$$\vec{u}_{t_0, \Omega} = 0; \quad P_{t_0, \partial\Omega} = P_0 \equiv 0; \quad T|_{t_0, \Omega} = T_1; \quad T|_{t_0, \Omega} = T_2. \quad (7)$$

З фізичних міркувань на внутрішніх межах стінок промковша ( $\partial\Omega$ ) для швидкості діє умова прилипання і непроникності (тангенціальна та нормальна компоненти швидкості дорівнюють 0):

$$\vec{u}|_{\partial\Omega} = 0. \quad (8)$$

На вільній поверхні розплаву, в залежності від в'язкості шлаку для швидкості обираються кілька варіантів граничних умов. У загальному випадку тільки нормальна компонента швидкості буде дорівнювати 0:

$$\vec{n} \cdot \vec{u}|_{\partial\Omega} = 0; \quad P|_{\partial\Omega} = 0, \quad (9)$$

де  $\vec{n}$  – зовнішня нормаль від границі.

На осі симетрії ставляться граничні умови ковзання (для швидкості) і

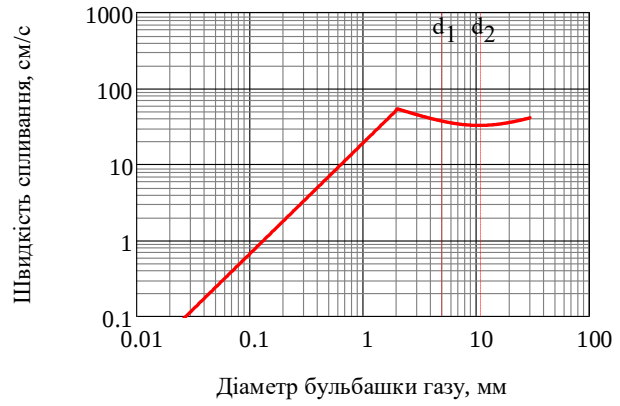


Рисунок 1 – Відносна швидкість спливання газової бульбашки  $V_r$  в розплаві.

відсутності потоків:

$$\vec{n} \cdot \vec{u}|_{\partial\Omega} = 0; \quad \vec{n} \cdot (-\lambda_m \nabla T)|_{\partial\Omega} = 0; \quad \vec{n} \cdot (-D_{\text{сф}} \nabla \beta)|_{\partial\Omega} = 0. \quad (10)$$

Для (умовно) зовнішніх стінок проміжного ковша та вільної поверхні розплаву укритего шлаком ( $\partial\Omega$ ) задані умови конвективної віддачі тепла навколишньому середовищу ( $T_{\text{сеп}} = 303 \text{ K}$ )

$$\vec{n} \cdot (-\lambda \nabla T)|_{\partial\Omega} = q_{\text{біч}} = \frac{\lambda_{\text{біч}}}{\delta_{\text{біч}}} (T - T_{\text{сеп}}), \quad (11)$$

$$\vec{n} \cdot (-\lambda \nabla T)|_{\partial\Omega} = q_{\text{днище}} = \frac{\lambda_{\text{днище}}}{\delta_{\text{днище}}} (T - T_{\text{сеп}}), \quad (12)$$

$$\vec{n} \cdot (-\lambda \nabla T)|_{\partial\Omega} = q_{\text{шл}} = \frac{\lambda_{\text{шл}}}{\delta_{\text{шл}}} (T - T_{\text{сеп}}) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{сеп}}^4), \quad (13)$$

де  $\lambda_{\text{біч}}$ ,  $\lambda_{\text{днище}}$ ,  $\lambda_{\text{шл}}$  – коефіцієнти тепловіддачі через стінки і днище промковша, а також шлаковий покров;  $\delta_{\text{біч}}$ ,  $\delta_{\text{днище}}$ ,  $\delta_{\text{шл}}$  – відповідні товщини стінок, днища та шару шлаку відповідно,  $\lambda_{\text{шл}}/\delta_{\text{шл}} = 60 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Умови надходження та витікання розплаву відповідають фізичній постановці задачі:

$$\vec{n} \cdot \vec{u}|_{\partial R_{\text{екв}}} = -u_0(t) + v_{\text{дзерк}}(t); \quad p|_{\partial R_{\text{екв}}} = 0; \quad T|_{\partial R_{\text{екв}}} = T_1; \quad (14)$$

$$\vec{\tau} \cdot \vec{u}|_{\partial r_{\text{екв}}} = 0; \quad p|_{\partial r_{\text{екв}}} = 0; \quad \vec{n} \cdot (-\lambda \nabla T)|_{\partial r_{\text{екв}}} = 0, \quad (15)$$

де  $\vec{\tau}$  – одиничний вектор дотичної до границі;  $\partial R_{\text{екв}}$ ,  $\partial r_{\text{екв}}$  – границі еквівалентної захисної труби та еквівалентного розливного стакана, які задовольняють витратам розплаву, що надходить ( $Q_R$ ) і витікає ( $Q_r$ ) з промковша, відповідно.

У другому розділі також наведена узагальнююча оцінка теплової обстановки промковша та джерел теплових втрат (рис. 2) та обґрунтовано раціональні напрямки можливої модифікації геометричних параметрів промковша з точки зору енергозбереження.

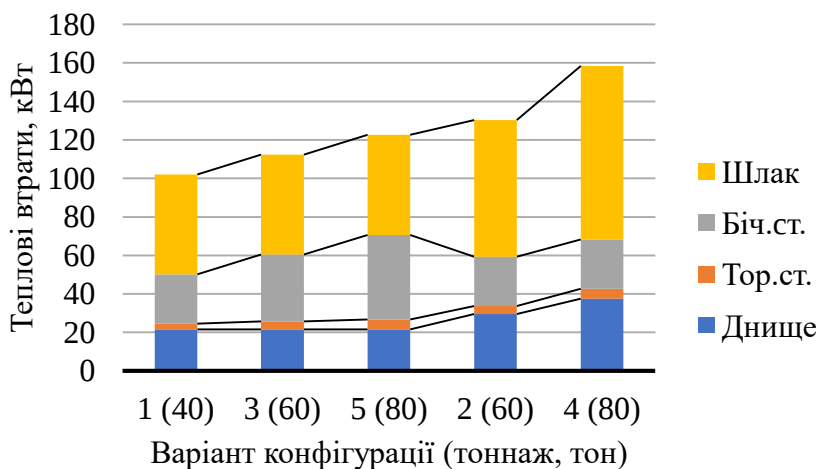


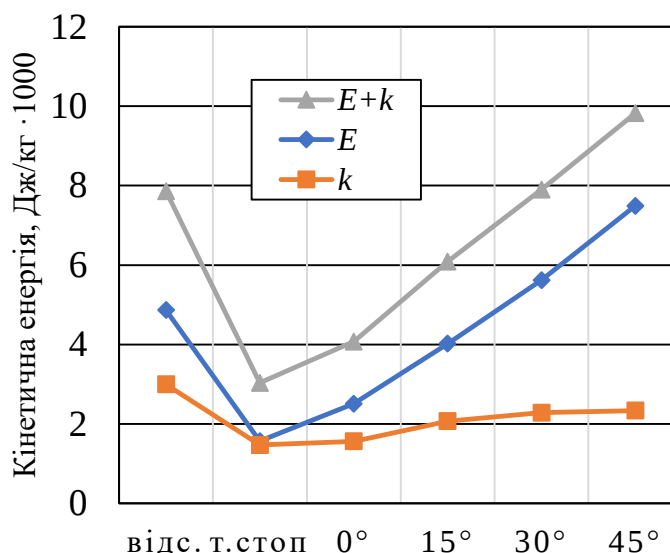
Рисунок 2 – Сукупні тепловтрати через зовнішні поверхні і частка тепла, що втрачається, яка припадає на різні поверхні промковша в залежності від співвідношення геометричних параметрів та відповідного тоннажу проміжного ковша.

У третьому розділі «Аналіз результатів моделювання гідродинамічних процесів в сталих і перехідних режимах промковша» розглядаються

гідродинамічні аспекти формування струменевих течій в порожнині проміжного ковша в залежності від його внутрішньої конфігурації і вбудованих елементів. Увага приділена пасивному формуванню структури течій та впливу конфігурації вбудованих елементів на вимушену конвекцію в порожнині промковша. Дослідження циркуляційних потоків металу проводилися методом математичного моделювання стосовно моделей 40- та 60-тонного проміжних ковшів двоструменевої слябової МБРЗ конверторного цеху ПАТ МК «Азовсталь», конструкція яких описана в другому розділі роботи. Чисельне моделювання гідродинаміки потоків металу проводили стосовно розливання сталі в кристалізатори перерізом 1850×250 мм і витягування слябів зі швидкістю 0,7–0,8 м/хв.

Аналіз результатів моделювання підтвердив ефективність застосування обмежуючої турбулентності вставки «турбостоп» та виявив недоліки типової конструкції, яка також призводить до триразового падіння інтенсивності загальних процесів перемішування в порожнині промковша одночасно зі зниженням турбулізації розплаву до 50 % від початкової енергії (рис. 3).

Рисунок 3 – Питомі значення кінетичної енергії потоків, осереднені за об'ємом проміжного ковша для різних варіантів: порожній промковш (відс.), промковш із вставкою «турбостоп» (т.стоп) та серія варіантів вставок з нахилом ( $0^\circ$ – $45^\circ$ ). Графіки відповідають кінетичній енергії усередненого руху потоку ( $E$ ), турбулентним пульсаціям ( $k$ ) і сумарній кінетичній енергії залученої в рух маси розплаву ( $E+k$ ).



Показано, що вторинні НВ, які потрапляють у промковш з новими порціями сталі або утворюються у ПК, практично не вступають у взаємодію зі шлаком, оскільки динамічні процеси руху для них домінують над силами плавучості і єдиним можливим способом інтенсифікувати процес асиміляції таких частинок є організація доставки всього об'єму розплаву у приповерхневу зону з турбулізацією приповерхневих шарів біля межі «метал – шлак».

Моделювання свідчить що альтернативні вбудовані елементи з похилими стінками (рис. 3, 4), розглянуті в роботі, менше пригнічують циркуляційний рух в промковші при збереженні ефективності пригнічення турбулентності порівняно з типовою конструкцією «турбостоп».

Також у розділі за результатами моделювання визначені гідродинамічні чинники погіршення якості металу, що отримується під час перехідних режимів роботи промковша та їх вплив на забрудненість готової сталі за результатами вимірювань.

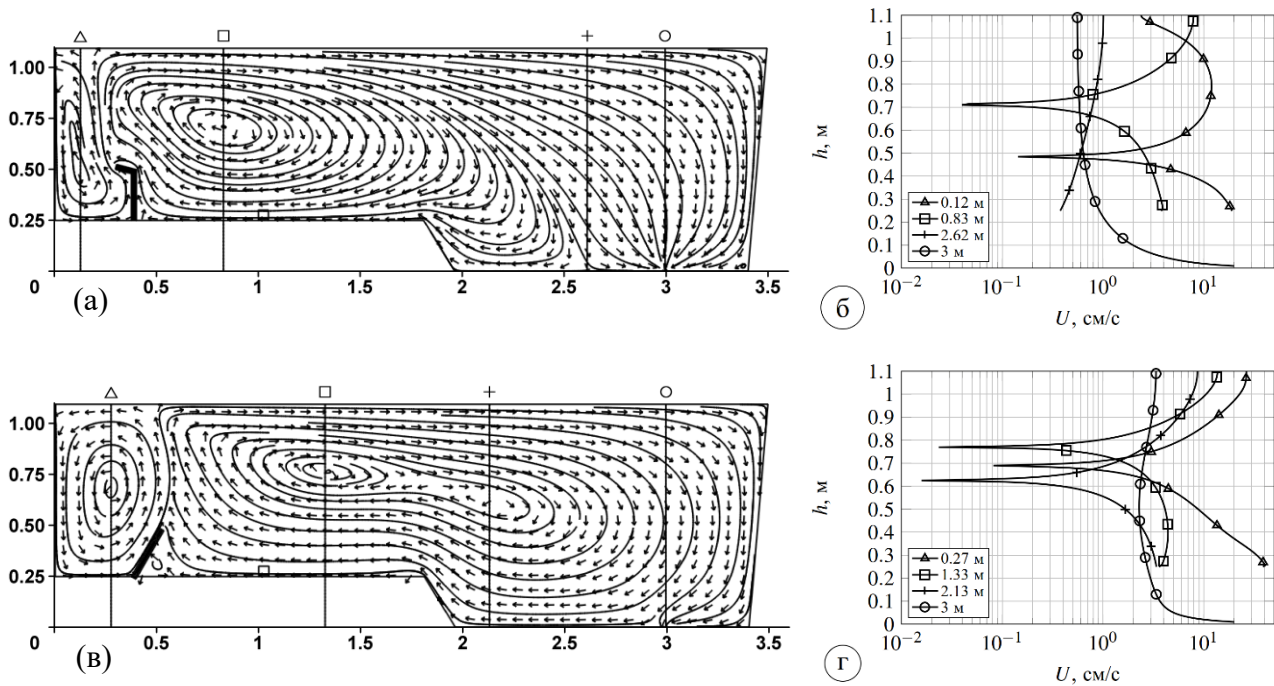


Рисунок 4 – Структура течій у промковшї з внутрішнім елементом та відповідні абсолютні значення швидкості руху потоків в характерних вертикальних поперечних перетинах: а, б – промковш із вставкою типу «турбостоп»; в–г – із вставкою з нахилом бічних граней на 30°.

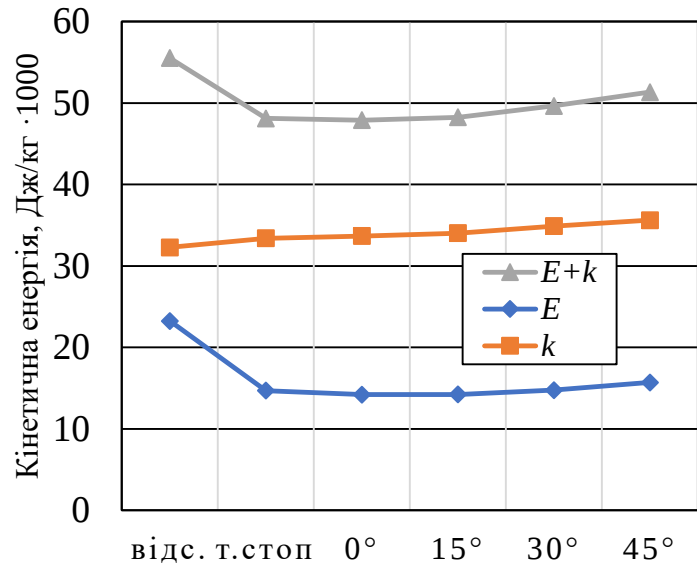
У четвертому розділі «Аналіз впливу процесу продувки ванни промковша на кінетику видалення неметалічних включень» розглядаються гідродинамічні аспекти формування струменевих течій в порожнині проміжного ковша в залежності від його внутрішньої конфігурації і вбудованих елементів під дією бульбашкового режиму продувки. Увага приділена аналізу структури течій при наявності продувки аргоном та впливу на характер вимушеної конвекції в порожнині промковша поєднання продувки з облаштуванням промковша вбудованими елементами.

У розділі наведені результати дослідження щодо вибору параметрів і припустимого діапазону режимів продувки аргоном, за яких не повинно спостерігатися погіршення умов роботи проміжного пристрою через надмірну турбулізацію або виникнення негативних явищ на межі розділу «метал – шлак». Для виконання умови транспортування всього об'єму металу, що надходить в проміжний ківш, в зону розділу «метал – шлак» у якості приєднаної маси необхідно подати витрату газу у вигляді сукупності окремих бульбашок в перерахунку на умови холодного аргону відповідає 6–7 м<sup>3</sup>/год. Близьке значення витрати газу отримано з умови мінімізації збурень на межі розділу «метал – шлак», що порушують рівновагу у стратифікації шарів металу і шлаку.

Завдяки бульбашковому характеру руху газової фази та внесенню в об'єм розплаву додаткового імпульсу разом з потоком аргону та його тепловим розширенням, кінетична енергія турбулентного руху в разі продувки перевищує більш ніж в 2.35 рази енергію усередненого руху, який також інтенсифікується введенням газової фази в 2–9 (~ 4.6) разів в залежності від конфігурації вбудованих елементів (рис. 5). Отже, спостерігається сукупне збільшення інтенсивності циркуляційних процесів в проміжному ковшї з ростом кінетичної

енергії в 5–16 разів і значним ростом розосередженої турбулізації розплаву, що не є локалізованою в околі придонних потоків, з переносом зони максимальної інтенсифікації процесів в приповерхневу область контакту зі шлаком, що у третьому розділі визначено бажаним станом з точки зору забезпечення можливості видалення дрібних фракцій вторинних неметалічних включень.

Рисунок 5 – Питомі значення кінетичної енергії потоків, осереднені за об'ємом проміжного ковша для різних варіантів: порожній промковш (відс.), промковш зі вставкою «турбостоп» (т.стоп) і серія варіантів вставок з гладкою кромкою і різним нахилом ( $0^\circ$ – $45^\circ$ ). Графіки відповідають кінетичній енергії усередненого руху потоку ( $E$ ), турбулентним пульсаціям ( $k$ ) і сумарній кінетичній енергії залученої в рух маси розплаву ( $E+k$ ).



Відповідно до теорії струменевих течій, що розвиваються в обмеженому просторі, в об'ємі розплаву в порожнині проміжного ковша можна виділити наступні характерні зони (рис. 6): зона прямого (транзитного) потоку довжиною  $L$ ; зона зворотного (циркуляційного) потоку; ділянка, де зона 2 захоплює рідкий метал; ділянка, розташовану у верхній частині зони зворотного потоку поблизу перегородки, де відбувається поповнення прямої течії за рахунок рідкого металу із зони зворотної циркуляції.

Для аналізу впливу гідрогазодинамічних потоків, що розвиваються в обмеженому просторі промковша МБРЗ, на інтенсивність масообміну та процесу видалення НВ запропоновано застосовувати критерії на основі інтегральних величин значень питомої кінетичної енергії усередненого руху  $K$  і питомої кінетичної енергії турбулентного руху  $K_T$  характерних зон ( $\Omega$ ) течії (рис. 4.15):

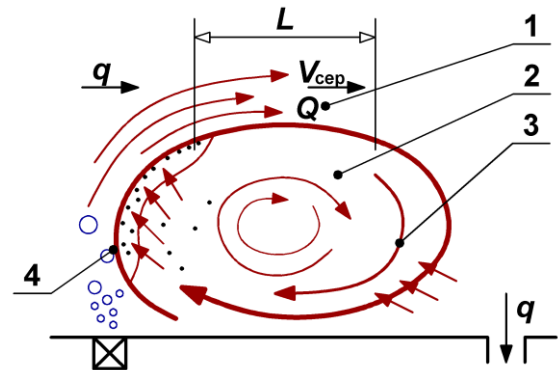


Рисунок 6 – Характерні зони течій в обмеженому просторі промковша.

$$K = \frac{1}{2S} \iint_{\Omega} (u^2 + v^2) dx dy; \quad K_T = \frac{1}{S} \iint_{\Omega} k dx dy, \quad (16)$$

де  $u$ ,  $v$ ,  $k$  – локальні значення проєкцій швидкості і кінетичної енергії турбулентного руху, одержувані з моделі  $k$ – $\varepsilon$ , відповідно;  $S = \iint_{\Omega} dx dy$  – площа

виділеної зони течії  $\Omega$ . Інтеграли наведені для випадку модельної задачі, розглянутої в роботі.

Запропоновано метод виділення характерних зон течії (рис. 7) за допомогою попередньо обрахованих контурів ізолій, які проходять по границях меж циркуляційних і прямих течій і можуть бути визначені за допомогою обробки інформації про поле швидкостей руху розплаву, що отримується у процесі моделювання. Для маси металу в ковші  $M = 40000$  кг, кінетичну енергію окремої зони з повздовжньою площею  $S$  можна визначити за допомогою формули  $K_{\text{зони}} = (M/S) \cdot K$ .

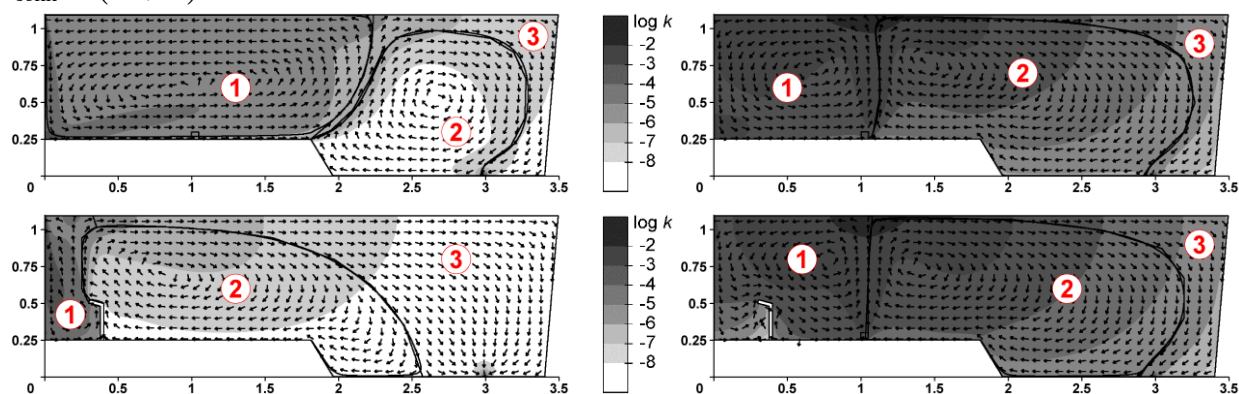


Рисунок 7 – Визначення характерних зон потоків розплаву за допомогою пограничних ізолій: 1, 2 – зони циркуляції ( $\Omega_1$  і  $\Omega_2$ ); 3 – зона прямої течії ( $\Omega_3$ ).

Визначення характерних зон течії дає можливість оцінити відношення пульсаційної швидкості до швидкості осередненого руху і бачити, в яких саме зонах домінує турбулентний перенос ( $u'/U_{\text{сер}} > 1$ ) і за яких умов конфігурації та продувки. У таблиці 1 позначено комірки, що відповідають найбільшій інтенсифікації турбулентних процесів серед розглянутих комбінацій параметрів донної вставки та режимів продувки, вони відповідають діапазону кутів розкриття бічних стінок вставки  $15^\circ$ – $30^\circ$  при наявній продувці у  $6 \text{ м}^3/\text{год}$ .

Таблиця 1

Відношення пульсаційної швидкості турбулентного руху до швидкості упорядкованого руху  $u'/U_{\text{сер}}$  по виділеним зонам промковша.

| Варіант    |   | З донним уступом |      |      |                       |      |      | З плоским дном |      |      |                       |      |      |
|------------|---|------------------|------|------|-----------------------|------|------|----------------|------|------|-----------------------|------|------|
| Продувка   |   | —                |      |      | 6 м <sup>3</sup> /год |      |      | —              |      |      | 6 м <sup>3</sup> /год |      |      |
| Вставка    |   | —                | 15°  | 30°  | —                     | 15°  | 30°  | —              | 15°  | 30°  | —                     | 15°  | 30°  |
| Зона       | 1 | 0,79             | 0,63 | 0,55 | 1,02                  | 1,67 | 1,70 | 0,40           | 0,62 | 0,54 | 1,04                  | 1,52 | 1,55 |
|            | 2 | 0,98             | 1,14 | 1,11 | 1,59                  | 1,51 | 1,47 | 0,90           | 1,07 | 1,02 | 1,22                  | 1,36 | 1,35 |
|            | 3 | 1,03             | 0,89 | 0,84 | 1,69                  | 2,16 | 2,10 | —              | 0,94 | 0,85 | 1,52                  | 2,07 | 2,19 |
| Весь об'єм |   | 0,78             | 0,73 | 0,66 | 1,20                  | 1,59 | 1,56 | 0,81           | 0,72 | 0,64 | 1,12                  | 1,45 | 1,45 |

На рисунку 8 зображені порівняльні графіки відношення швидкості пульсацій до середньої швидкості руху розплаву в об'ємі промковша в залежності від конфігурації і наявності продувки для таблиці 1. При визначенні за всіма прийнятими до розгляду у модельній задачі умовами та режимами дії на розплав збурюючих факторів в системі «метал – шлак» в приповерхневих шарах

металу та шарі шлаку сила плавучості домінує (локальне значення критерія Річардсона  $Ri \approx 9$ ) і наявні найбільш інтенсивні конвективні потоки достатньо обмежені визначеними технологічними умовами продувки та конфігурацією внутрішніх елементів, що пригнічують турбулентність. Це гарантує відсутність порушення покривного шлаку та одночасно безперервне збереження активної взаємодії шлаку з розплавом на всій розвиненій поверхні контакту.

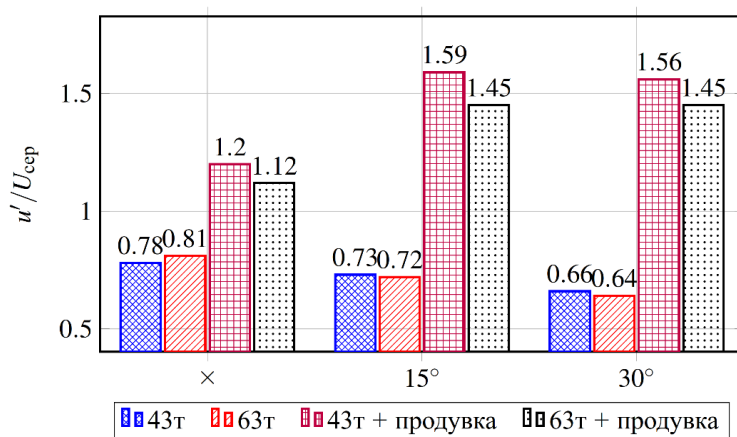


Рисунок 8 – Інтегральні показники відношення швидкості турбулентних пульсацій до середньої швидкості руху розплаву в об'ємі промковша в залежності від похилості стінок вбудованого елемента і наявності продувки.

Розглянуті механізми видалення неметалічних включень перевірені в умовах ПАТ МК «Азовсталь» (м. Маріуполь) при безперервному литті слябів зі сталі категорій міцності Х60 і Х70. Експериментальний варіант проміжного ковша було обладнано дослідною донною фурмою з просторово орієнтованими каналами, що забезпечує бульбашковий режим продувки. Діапазони індексів забрудненості металу різними типами включень наведені в таблиці 2.

На підставі результатів дослідження розроблена вдосконалена технологія з наступними оптимізованими параметрами:

- проміжний ківш облаштовується донними фурмами у вигляді поперечних продувних блоків, які забезпечують бульбашковий режим продувки аргонем по всьому поперечному перетину промковша на шляху від точки падіння затопленого струменя з стальковша до стаканів кристалізаторів;
- оптимальне віддалення продувних блоків від центральної осі та струменя з стальковша, дорівнює 0.9–1.1 м для 43-тонного промковша з уступом та 1.1–1.3 м для конфігурації промковша з плоским дном;
- для транспортування всього об'єму металу, що надходить в проміжний ківш, в зону контакту «метал – шлак» у якості приєднаної маси за умови збереження припустимого рівня збурень у сталій стратифікації шарів металу та шлаку забезпечується продувка з витратою газу у вигляді сукупності окремих бульбашок в перерахунку на умови холодного аргону, що подається, на рівні не 6–7 м<sup>3</sup>/год на один продувний блок;
- для підтримки інтенсивності конвективних циркуляційних течій розплаву по всьому об'єму промковша без утворення застійних зон або зон занадто повільними процесами при одночасному зменшенні придонної

турбулізації та пригніченні потенційно можливих короткозамкнених течій до кристалізаторів зона падіння струменя зі сталювша незалежно від наявності і дії продувки обмежується вбудованим обмежувальним елементом з кутом розкриття торцевих стінок в діапазоні  $2 \times (15^\circ - 30^\circ)$  відносно вертикальної осі.

Таблиця 2

Діапазони індексів забрудненості дослідного і порівняльного металу

| Тип включень | Індекс забрудненості, $I \times 10^{-3}$ |                 |
|--------------|------------------------------------------|-----------------|
|              | Порівняльний метал                       | Дослідний метал |
| Силікати     | 0.23 – 1.48                              | 0.01 – 0.44     |
| Сульфід      | 0.06 – 0.44                              | 0.05 – 0.36     |
| Оксиди       | 0.08 – 1.08                              | 0.10 – 0.66     |
| Всі типи     | 0.83 – 2.33                              | 0.46 – 1.24     |

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача розробки на основі встановлених гідрогазодинамічних закономірностей і сформульованого механізму видалення неметалічних включень технології рафінування рідкого металу в проміжному ковші МБРЗ для отримання листового прокату з низьколегованих сталей відповідального призначення. Її основні наукові і практичні результати полягають у наступному:

1. На основі механізмів руху газових бульбашок в розплаві поставлена модельна задача гідрогазодинамічних та тепломасообмінних процесів в проміжному ковші, що дозволяє аналізувати процес обробки розплаву із застосуванням продувки аргонном. Застосована математична модель заснована на системі рівнянь у наближенні Буссінеска та  $k-\varepsilon$  моделі турбулентності і включає рівняння Нав'є-Стокса, нерозривності, рівняння для об'ємної частки газової фази, рівняння теплопереносу, рівняння для кінетичної енергії турбулентного руху і її дисипації з початковими і граничними умовами та відрізняється: способом обліку взаємодії газової фази з розплавом металу; способом дотримання актуальних швидкісних режимів в околах ділянок надходження та витоку розплаву одночасного з актуальною витратою металу через проковш за умов ідеалізованої репрезентації геометрії пристрою поставленою модельною задачею; урахуванням бічних стінок за допомогою уведення в відповідні рівняння спеціальних компонентів з функцією джерела збурення.

2. Сформульовано критерій інтенсивності процесів взаємодії розплаву з покривним шлаком на основі величин кінетичної енергії та енергії турбулентного руху в приповерхневому шарі розплаву, який дозволяє прогнозувати інтенсивність асиміляції неметалічних включень покривним шлаком та ймовірність затягування шлаку в об'єм розплаву і тим самим знаходити параметри максимально припустимих режимів дії на розплав за умови конкретної комбінації розглянутих факторів (інтенсивності циркуляції розплаву, ступеня його турбулізації та інтенсивності бульбашкової продувки).

3. Уперше для проміжного ковша запропоновано метод аналізу структури потоків розплаву за допомогою виявлення характерних зон течії розплаву по контурах ізоліній (або ізоперхонь), що проходять на межах розділу циркуляційних і прямих течій, та обчислення середньої величини кінетичної енергії, а також енергії турбулентного руху сукупно та по окремих зонах, що дозволяє оцінювати час перебування розплаву в проміжному ковші та приповерхневому шарі. Метод відрізняється від підходів, що використовують ситуативний спосіб виокремлення зон металургійного агрегату (комірок ідеального змішування та витіснення), можливістю аналізу складних просторово-розвинених процесів, де неможливо визначити розмежування зон поширеними на практиці способами. Запропонований метод завдяки універсальним простим принципам можна розповсюдити для аналізу будь-яких агрегатів та просторових конфігурацій об'ємних процесів, де розглядається суцільне середовище.

4. Виявлено закономірності впливу режимів продувки і параметрів багатоканальної поперечної донної фурми на формування газогідродинамічних потоків в проміжному ковші з встановленням впливу геометричних параметрів вбудованих елементів на структуру потоків металу в проміжному ковші МБРЗ в процесі обробки продувкою аргоном та без неї, що дозволило визначити поєднання режимів продувки, параметрів багатоканальної поперечної донної фурми і геометричних параметрів вбудованих елементів, а також параметрів розташування фурми та вбудованих елементів, що забезпечують формування режимів течії з зонами зворотної циркуляції, які надають позитивний ефект рафінуванню рідкого металу і гомогенності розплаву перед надходженням до кристалізаторів.

5. Визначено причини зниження рафінувальної дії проміжного ковша і підвищення забрудненості металу неметалічними включеннями в процесі перехідних режимів, коли не сформовані стабілізовані циркуляційні потоки, що відповідає отриманим результатам промислових досліджень впливу перехідних режимів на якість металу, у яких встановлено відсорткування металу за різними дефектами, розлитого в перехідних і стаціонарному режимах безперервного розливання, становлять 0.51 і 0.44%, а також 1.71 і 0.70%, що свідчить про зниження у 1.2 і 2.4 рази, відповідно.

6. Застосування розробленої технології рафінування металу в проміжному ковші МБРЗ у вигляді визначеного у роботі поєднання режимів продувки, параметрів багатоканальної поперечної донної фурми і геометричних параметрів вбудованих елементів, а також параметрів розташування фурми та вбудованих елементів, що забезпечують формування необхідних режимів течії, має забезпечити ефективне зменшення загальної забрудненості литого металу від вторинних неметалічних включень в 2 рази з практично повним видаленням включень розміром понад 30 мк.

7. Складові технології були перевірені в умовах ПАТ МК «Азовсталь» (м. Маріуполь) при безперервному литті слябів зі сталі категорій міцності Х60 і Х70 на експериментальному варіанту проміжного ковша, обладнаного дослідною донною фурмою з просторово орієнтованими каналами, що

забезпечувала необхідний бульбашковий режим продувки. За результатами проведених досліджень забрудненості безперервнолитих слябів загальний індекс забрудненості на дослідному металі на 52% нижче, ніж на порівняльному; кількість включень розміром менше 10 мк в загальній масі включень становить на порівняльному металі – 43.9%, на дослідному металі – 68.9%; кількість включень розміром понад 30 мк в загальній масі включень становить на порівняльному металі – 29.0%, на дослідному металі – відсутні.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Babanin A., Babanina O., **Komarov V.** et al. The Influence of Technological Parameters of X70 Stainless Steel Ladle Refining on the Residual Content of Non-Metallic Inclusions // Archives of Foundry Engineering. 2015. Vol. 15. Issue 3. P. 5–10. DOI: <https://doi.org/10.1515/afe-2015-0049> (SCOPUS)

2. Dyudkin D. A., Belousov V. V., **Komarov V. F.** et al. Influence of transient conditions in continuous casting on billet quality // Steel in Translation. 2008. Vol. 38. No. 9. P. 748–751. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091208090118> (SCOPUS)

### Статті у наукових фахових виданнях України:

3. Найдек В. Л., Тарасевич Н. И., **Комаров В. Ф.** та ін. Моделирование гидрогазодинамических процессов в полости промежуточного ковша машины непрерывной разливки стали // Доповіді Національної академії наук України. 2009. № 5. С. 73–77. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/8512>

4. **Комаров В. Ф.** Разработка математической модели процесса инъекции газа в расплав // Вісник Донецького національного університету. Сер. А : Природничі науки. 2009. № 2. С. 264–268.

5. Куликов Е. И., **Комаров В. Ф.**, Белоусов В. В. Численное моделирование процессов перемешивания при продувке ванны агрегата «ковш–печь» // Математичне моделювання. 2007. № 2 (17). С. 61–63. URL: <http://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/74/64/15st-8.pdf>

6. Дымнич А. Х., Недопекин Ф. В., **Комаров В. Ф.** и др. К вопросу о тепловых потерях в сталеразливочном ковше // Металл и литье Украины. 2006. № 3–4. С. 23–26.

7. **Комаров В. Ф.** Численное моделирование процесса продувки в промковше в условиях естественной конвекции // Металургійна теплотехніка: Збірник наукових праць Національної металургійної академії України. Дніпропетровськ : “ПП Грек О.С.”, 2006. С. 168–172.

8. **Комаров В. Ф.**, Недопекин Ф. В., Белоусов В. В. Численное моделирование гидродинамики в промежуточном ковше МНЛЗ в переменных вихрь-функция тока // Металлургическая теплотехника. Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. Днепропетровск : НметАУ, 2003. Т. 9. С. 70–77.

### Монографія:

9. Математическое обеспечение и компьютерные технологии для моделирования гидродинамических и теплофизических процессов в

металлургии : монография / В. И. Бондаренко, **В. Ф. Комаров**, Ф. В. Недопекин и др. Донецк : Юго-Восток, 2013. 210 с. ISBN: 978-966-374-766-8.

#### **Публікації у наукових збірниках, тощо:**

10. Белоусов В. В., Гончар Б. С., **Комаров В. Ф.**, Ноговицын А. В. Роль турбулентности в процессах непрерывного рафинирования стали в ванне промежуточного ковша МНЛЗ // Современные огнеупоры: ресурсосбережение и применение в металлургических технологиях: Сб. научн. тр. / Под ред. проф., д.т.н. А. Н. Смирнова. Донецк : Изд-во «Ноулидж», 2013. С. 157–160.

11. **Комаров В. Ф.** Математическая модель гидродинамических и тепло массообменных процессов для расчета тепловых потерь в промежуточном ковше МНЛЗ с продувкой // Труды Второго международного научно-практического семинара «Повховские научные чтения». Донецк : ДонНУ, 2012. С. 44–49.

12. Гончар Б. С., Ноговицын А. В., **Комаров В. Ф.** и др. Гидрогазодинамические аспекты интенсификации удаления неметаллических включений в инновационных технологиях внепечного рафинирования жидкой стали в промежуточном ковше МНЛЗ // Научно-практическая конференция «Инновационные технологии внепечной обработки чугуна и стали». Донецк, 2011. URL: <http://uas.su/conferences/2011/vnepechnaya/29/razdel29.php>

13. Гончар Б. С., Дюк Е. Ф., **Комаров В. Ф.** и др. Исследование условий формирования стабилизирующего пузырькового режима течения газа при донной продувке жидкой стали в промежуточном ковше МНЛЗ // 50 лет непрерывной разливки стали в Украине: Сб. научн. тр. / Под ред. проф., д.т.н. Дюдкина Д. А., проф., д.т.н. Смирнова А. Н. Донецк : Изд-во «Ноулидж» (донецкое отделение), 2010. С. 386–396. URL: <http://uas.su/conferences/2010/50let/46/00046.php>

14. **Комаров В. Ф.** К вопросу о влиянии гидрогазодинамических потоков в промежуточном ковше на процесс удаления неметаллических включений в зоне раздела «металл–шлак» // Труды первого международного научно-практического семинара «1-е Повховские научные чтения» / Под ред. Ступина А. Б. Донецк : ДонНУ, 2010. С. 71–76.

15. **Комаров В. Ф.** Разработка математической модели процесса инъекции газа в расплав // Труды международного научно-практического семинара «Гидродинамика и экология». К 100-летию со дня рождения чл.-корр. НАН Украины профессора И. Л. Повха (Донецк, 11–12 ноября 2009 г.) / Под ред. Ступина А. Б. Донецк : ДонНУ, 2009. С. 103–107.

16. **Комаров В. Ф.** Недопекин Ф. В., Белоусов В. В. Математическое моделирование гидродинамики в промежуточном ковше // Вісник Донецького національного університету. Сер. А : Природничі науки. 2002. № 2. С. 265–269.

#### **Матеріали наукових конференцій:**

17. Кислица В. В., Гончар Б. С., **Комаров В. Ф.** и др. Исследование гидродинамических особенностей использования металлоприемника (турбостоп) в комплексной технологии рафинирования жидкой стали от неметаллических включений в промежуточных ковшах МНЛЗ // Труды

Двенадцатого конгресса сталеплавателей (г. Выкса, 22–26 октября 2012 г.). М. : Metallurgizdat, 2013. С. 302–306.

18. Белоусов В. В., Бондаренко В. И., **Комаров В. Ф.**, и др. Разработка математического обеспечения для исследования процессов гидродинамики и теплообмена // XIV Минский международный форум по тепло- и массообмену 10–13 сентября 2012 г. Тезисы докладов и сообщений. Т. 2, Ч. 1. Минск, 2012. С. 21–25.

19. Гончар Б. С., Дюк Е. Ф., **Комаров В. Ф.** и др. Эффективность использования металлоприемника (“турбостоп”) в комплексной технологии рафинирования жидкой стали от неметаллических включений в промежуточных ковшах МНЛЗ // Материалы II промышленного инвестиционного форума: VIII международной специализированной выставки–конференции «Литье–2012». Запорожье : Запорожская торгово–промышленная палата, 2012. С. 49–50.

20. **Комаров В. Ф.**, Недопекин Ф. В. Кинетическая энергия потоков как критерий прогнозирования процесса удаления неметаллических включений // Матеріали IV міжнародної конференції «Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу». Дніпропетровськ : ДНУ, 2012. С. 233–234.

21. **Комаров В. Ф.**, Белоусов В. В., Недопекин Ф. В., Гончар Б. С. К вопросу о влиянии гидрогазодинамических потоков в проковше МНЛЗ на процесс удаления неметаллических включений // Праці XVI міжнародної конференції «Теплотехніка та енергетика в металургії». НМетАУ, м. Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2011. С. 109.

22. **Комаров В. Ф.**, Белоусов В. В., Недопекин Ф. В., Гончар Б. С. Моделирование гидрогазодинамических потоков в промежуточном ковше МНЛЗ // Міждержавна науково–методична конференція «Проблеми математичного моделювання». Тези доповідей. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2011. С. 57–58.

23. **Комаров В. Ф.**, Бабанин А. Я., Недопекин Ф. В., Белоусов В. В. Гидродинамические и теплофизические процессы в ванне промежуточного ковша // VI Минский международный форум по тепло- и массообмену 19–23 мая 2008 г. Тезисы докладов и сообщений. Т. 2. Минск, 2008. С. 320–321.

24. **Комаров В. Ф.**, Белоусов В. В., Недопекин Ф. В. Численное моделирование процессов продувки в проковше в условиях конвекции // Міждержавна науково–методична конференція «Проблеми математичного моделювання». Тези доповідей. — Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2008. С. 118–120.

25. **Комаров В. Ф.**, Белоусов В. В., Недопекин Ф. В. Математическое моделирование потоков расплава в трехсекционном промежуточном ковше слябовой МНЛЗ в период нестационарных переходных режимов // Міждержавна науково–методична конференція «Проблеми математичного моделювання». Тези доповідей. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2007. С. 111.

26. **Комаров В. Ф.**, Белоусов В. В., Куликов Е. И. Гидродинамические и теплофизические процессы в ковш–печи // Міждержавна науково–методична конференція «Проблеми математичного моделювання». Тези доповідей. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2006. С. 74–75.

## АНОТАЦІЯ

**Комаров Василь Федорович. Удосконалення методу видалення неметалічних включень впливом на процеси переносу в розплаві у порожнині проміжного ковша. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 «Металургія чорних та кольорових металів і спеціальних сплавів» – Національна металургійна академія України, Міністерство освіти і науки України, м. Дніпро 2021.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної наукової задачі розробки на основі встановлених гідрогазодинамічних закономірностей і сформульованого механізму видалення неметалічних включень технології рафінування рідкого металу в проміжному ковші для отримання листового прокату з низьколегованих сталей відповідального призначення шляхом удосконалення параметрів проміжних ковшів слябових МБРЗ та умов продувки розплаву аргоном в них.

У роботі сформульовано критерій інтенсивності процесів взаємодії розплаву з покривним шлаком, який дозволяє знаходити максимально-припустимі режими дії на розплав з урахуванням комбінації факторів: інтенсивності циркуляції розплаву, ступеня його турбулізації та інтенсивності бульбашкової продувки.

Для промковша запропоновано метод аналізу структури потоків розплаву за допомогою виявлення характерних зон течії розплаву та обчислення середньої величини кінетичної енергії і енергії турбулентного руху сукупно та по окремих зонах, що дозволило оцінювати умови перебування розплаву в приповерхневому шарі. Метод відрізняється від підходів, що використовують ситуативний спосіб виокремлення зон металургійного агрегату (комірок ідеального змішування та витіснення), можливістю аналізу складних просторово-розвинених процесів, де неможливо визначити розмежування зон поширеними на практиці способами. Запропонований метод завдяки універсальним простим принципам можна розповсюдити для аналізу будь-яких агрегатів та просторових конфігурацій об'ємних процесів, де розглядається суцільне середовище.

Застосування розробленої технології рафінування металу в проміжному ковші МБРЗ у вигляді визначеного у роботі поєднання режимів продувки, параметрів багатоканальної поперечної донної фурми і геометричних параметрів вбудованих елементів, а також параметрів розташування фурми та вбудованих елементів, для формування необхідних режимів течії забезпечує ефективне зменшення загальної забрудненості литого металу від вторинних неметалічних включень в 2 рази з практично повним видаленням включень розміром понад 30 мк, що було перевірено в умовах ПАТ МК «Азовсталь» (м. Маріуполь) при безперервному литті слябів зі сталі категорій міцності Х60 і Х70 в рамках виробничого експерименту.

**Ключові слова:** БЕЗПЕРЕРВНЕ ЛИТТЯ, ПРОМІЖНИЙ КІВШ, КОЕФІЦІЄНТ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ, НЕМЕТАЛІЧНІ ВКЛЮЧЕННЯ, ТУРБУЛЕНТНІСТЬ, ПРОДУВКА, ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.

## ABSTRACT

**Vasyl Komarov. Improvement of the method of non-metallic inclusions removing by influencing the transfer processes in the melt in the cavity of the tundish ladle. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.**

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.16.02 "Metallurgy of ferrous and nonferrous metals and special alloys" – National metallurgical academy of Ukraine, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro 2021.

The dissertation is devoted to the decision of an actual scientific problem of development on the basis of the established hydro and gas dynamic laws and the formulated mechanism of nonmetallic inclusions removal of refining technology of liquid metal in a tundish ladle by means of the formulated criterion of intensity of melt–slag interaction processes on the basis of proposed method of the qualitative analysis of structure of streams of melt in a tundish ladle and their turbulence.

The criterion of intensity of melt – coating slag interaction processes is formulated. The criterion helps to find the maximum allowable modes of action on the melt considering a combination of factors: melt circulation intensity, degree of turbulence and bubble purge intensity.

A method of analysis of the structure of melt flows via identification of characteristic zones of flow and calculation of the average kinetic energy, as well as energy of turbulent motion, for the whole volume and individual zones has been proposed for the tundish ladle. The method is preferred over the known approaches (based on cells of perfect mixing and displacement) which use the situational way of demarcation of zones in the volume of the metallurgical device, due to ability to analyze complex spatially developed processes in cases where it is impossible to determine the demarcated zones in the traditional way. The proposed method due to the universal simple principles can be expanded for analysis of any devices and processes with spatially developed configurations where approach of continuous medium is considered.

The application of the proposed technology of metal refining in the tundish ladle of CCM which consists of a combination of purge modes, parameters of multichannel transverse bottom lance and geometric parameters of built-in elements, which shapes tundish metal flows, as well as positioning of lance and built-in elements, guarantee 2 times purification of cast metal from secondary non-metallic inclusions with almost complete removal of inclusions larger than 30  $\mu\text{m}$ . Effectiveness of elements of proposed technology was tested experimentally in the conditions of PJSC MK "Azovstal" (Mariupol) during continuous casting of steel slabs of strength categories X60 and X70.

**Key words:** CONTINUOUS CASTING, TUNDISH LADLE, REJECTION RATE, NONMETALLIC INCLUSION, TURBULENCE, GAS INJECTION, NUMERICAL SIMULATION.