

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

КОМАРОВ ВАСИЛЬ ФЕДОРОВИЧ

УДК 669.18:621.746:532.543.7:66.067.8

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.16.02 – металургія чорних і кольорових
металів та спеціальних сплавів

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

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

В. Ф. Комаров

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник (консультант):
Крижановський Володимир Григорович,
доктор технічних наук, професор

Вінниця – 2021

АНОТАЦІЯ

Комаров В. Ф. 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 аргонном 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 μm . 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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

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 инжекции 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/vnepecnaya/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 инжекции 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. **Комаров В. Ф.** Удосконалення видалення неметалевих включень у проміжному ковші впливом на гідродинаміку та тепломасообмін // Матеріали наукової конференції професорсько-викладацького складу, наукових працівників і здобувачів наукового ступеня за підсумками науково-дослідної роботи за період 2017–2018 рр. (16–17 травня 2019 р.): у 2-х томах. Т. 2. Вінниця : Донецький національний університет імені Василя Стуса, 2019. С. 182–183.

18. 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.

19. Белоусов В. В., Бондаренко В. И., **Комаров В. Ф.**, и др. Разработка математического обеспечения для исследования процессов гидродинамики и тепломассопереноса // 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.

20. Гончар Б. С., Дюк Е. Ф., **Комаров В. Ф.** и др. Эффективность использования металлоприемника (“турбостопа”) 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.

21. **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.

22. **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.

23. **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.

24. **Комаров В. Ф.** Удаление неметаллических включений в расплаве путем управления гидродинамическими потоками жидкого металла в промежуточном ковше МНЛЗ // Матеріали наукової конференції професорсько–викладацького складу, наукових співробітників і аспірантів Донецького національного університету за підсумками науково–дослідної роботи за період 2009–2010 рр. / Під ред. П. В. Єгорова, С. В. Беспалової. Донецьк : Цифрова типографія, 2011. С. 134–135.

25. Белоусов В. В., Недопекин Ф. В., **Комаров В. Ф.** Разработка математической модели процесса инъекции газа в расплав // Матеріали наукової конференції професорсько–викладацького складу, співробітників і аспірантів Донецького національного університету за підсумками науково–дослідної роботи за період 2007–2008 рр. Т. 1 – Природничі науки, 6 квітня – 14 травня. Донецький національний університет. Донецьк : Цифрова типографія, 2009. С. 126–127.

26. **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.

27. **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.

28. **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.

29. **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.

30. **Комаров В. Ф.**, Недопекин Ф. В. Математическое моделирование тепловой обстановки в промежуточном ковше // Международная научно-техническая конференция: Прогрессивные технологии в металлургии стали: XXI век. Тез. докладов, 21–23 сентября 2004 г. Донецк : ДонНТУ, 2004. С. 34–35.

31. **Комаров В. Ф.**, Белоусов В. В., Недопекин Ф. В. Компьютерная трехмерная модель гидродинамики в промежуточном ковше // Международная научно-техническая конференция: Прогрессивные технологии в металлургии стали: XXI век. Тез. докладов, 21–23 сентября 2004 г. Донецк : ДонНТУ, 2004. С. 32–33.

32. **Комаров В. Ф.**, Недопекин Ф. В., Белоусов В. В. Математическое моделирование теплообмена в промковше // Тези доповідей Міждержавної науково–методичної конф.: Проблеми математичного моделювання (Дніпродзержинськ, 29–31 травня 2002). Дніпродзержинськ, 2003. С. 125–126.

33. **Комаров В. Ф.**, Белоусов В. В., Гридин С. В. Численные исследования гидродинамических процессов в промковше // Тези доповідей міждержавної науково–методичної конференції «Комп’ютерне моделювання». Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2001. С. 52–53.

34. **Комаров В. Ф.**, Белоусов В. В., Гридин С. В. Математическое моделирование гидродинамических процессов в промковше // Праці наукової конференції Донецького національного університету за підсумками НДР за період 1999–2000 р. Випуск “Природничі науки. Фізичні і комп’ютерні науки”. Донецьк, 2001. С. 13–14.

35. **Комаров В. Ф.**, Белоусов В. В., Гридин С. В., Недопекин Ф. В. Математическое моделирование гидродинамики в промежуточном ковше // Міждержавна науково–методична конференція «Комп’ютерне моделювання». Тези доповідей. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2000. С. 71–72.

ЗМІСТ

ВСТУП	15
РОЗДІЛ 1 СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАВДАННЯ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ..	24
1.1 Проміжний ківш в сучасній технології безперервного розливання..	24
1.2 Огляд існуючих моделей гідродинамічних, теплофізичних і масообмінних процесів в проміжному ковші	35
Висновки до першого розділу.....	37
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЬ ГІДРОДИНАМІЧНИХ, ТЕПЛОФІЗИЧНИХ І МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ У ПРОМІЖНОМУ КОВШІ.....	39
2.1 Постановка модельної задачі досліджень	40
2.2 Гідродинамічні процеси в промковші під час перехідних режимів..	52
2.3 Процес продування інертним газом та видалення неметалічних включень	55
2.4 Узагальнена математична модель гідродинамічних, теплофізичних і масообмінних процесів в проміжному ковші	64
2.5 Стратегії моделювання	67
Висновки до другого розділу	70
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В СТАЛИХ І ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ ПРОМКОВША	72
3.1 Перевірка адекватності поставленої моделі та отримуваних результатів чисельного моделювання процесів в проміжному ковші	73
3.2 Дослідження впливу внутрішньої конфігурації на гідродинамічні процеси в проміжному ковші.....	74
3.3 Оцінка можливостей організації ефективної доставки неметалічних включень до межі розділу «метал – шлак»	86
3.4 Аналіз негативного впливу перехідних режимів на гідродинаміку конвективних потоків в промковші	89
Висновки до третього розділу	97

РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПРОЦЕСУ ПРОДУВКИ ВАННИ ПРОМКОВША НА КІНЕТИКУ ВИДАЛЕННЯ НЕМЕТАЛІЧНИХ ВКЛЮЧЕНЬ.....	99
4.1 Фізичне моделювання поширення газових струменів в рідкому металі в залежності від конструктивних параметрів фурм і динамічних факторів витікання	100
4.2 Гідродинамічні процеси в проміжному ковші при різних режимах продувки.....	107
4.3 Аналіз енергетичних характеристик процесів у проміжному ковші з різними параметрами конфігурації та продувки	121
4.4 Перевірка елементів технології видалення неметалічних включень в умовах дослідного виробництва.....	140
Висновки до четвертого розділу.....	143
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	146
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	149
ДОДАТОК А.....	164
ДОДАТОК Б	166
ДОДАТОК В.....	168
ДОДАТОК Г	170

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

МБРЗ – машина безперервного розливання заготовок;

НВ – неметалічне включення;

ПК – проміжний ківш;

ПЧМ – прямий чисельний метод;

СЛАР – система лінійних алгебраїчних рівнянь;

ШУС – шлакоутворююча суміш.

ВСТУП

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 [1, 2]. Ключовим агрегатом машин безперервного розливання заготовок, в якому ще можливе проведення операцій по зниженню забрудненості металу неметалічними включеннями, служить проміжний ківш [3, 4]. Одним із відомих способів рафінування сталі від неметалічних включень є використання секціонованих проміжних ковшів з каналами в розділових перегородках, який також інколи використовується в поєднанні з продувкою металу інертним газом через каналні фурми.

Незважаючи на численні дослідження, присвячені аналізу процесів видалення неметалічних включень [5–8], 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 різних секціях 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 ДонНУ імені В. 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 В. 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:

1) розробити параметри проміжних ковшів слябових МБРЗ, що забезпечують ефективне виведення неметалічних включень до межі розділу «метал – шлак» завдяки створенню спрямованих гідродинамічних потоків рідкого металу;

2) визначити методами фізичного та математичного моделювання якісні та кількісні характеристики структури течій в проміжному ковші МБРЗ при різних режимах розливання;

3) дослідити особливості формування газорідних течій при донній продувці інертним газом з метою встановлення оптимальних технологічних параметрів продувки;

4) 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;

5) розробити комплексну технологію рафінування металу від неметалічних включень в проміжному ковші слябової МБРЗ із застосуванням оптимізованої конфігурації, донних каналних фурм для продувки металу аргоном, пристроїв для зниження циркуляції поблизу випускного стакану проміжного ковша;

6) визначити вплив розробленої нової технології безперервного рафінування сталей в проміжному ковші МБРЗ на забрудненість рідкого, литого і катаного металу неметалічними включеннями різного виду і 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 каналних 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 продувального 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 приймальні 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 аргоном 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 X60 і X70 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 [9–13] та у співавторстві. У працях, опублікованих у співавторстві, авторові належать: в [14] – побудова моделі, розробка та налагодження алгоритмів та програмного забезпечення, проведення обчислювальних експериментів та обробка результатів чисельного моделювання, в [15–17] – вибір математичних моделей та проведення обчислювальних експериментів, в [18–20] – дослідження гідродинамічних чинників впливу та обґрунтування критеріїв інтенсифікації процесу асиміляції неметалічних включень шлаковим покриттям, у [21] – отримання вихідних даних для оцінки інтенсивності процесів рециркуляції розплаву, в [22, 23] – участь в обґрунтуванні оптимальних параметрів продувки аргоном та побудова відповідної математичної моделі гідрогазодинамічних процесів для подальшої оптимізації топології, проведення розрахунків, у [24] – побудова алгоритму та чисельне моделювання теплового стану в багатошаровій стінці металургійного агрегату при тривалому періодичному впливі розплаву, у монографії [25] – 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 В. Стуса.

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи викладені в 35 публікаціях, в тому числі: 1 монографія, 8 робіт в фахових виданнях, 7 статей у збірниках наукових праць тощо, 19 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.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАВДАННЯ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

З розвитком безперервного розливання, що охопило в силу техніко-економічних переваг більше 95% всього виробництва вихідної сталі [3], виникли умови, де поєднання розливання і позаагрегатних способів рафінування металу є незаперечним. Це дозволило отримати новий рівень виробництва [3, 4, 25], в якому залишається багато питань, які потребують удосконалення [3], важливо розвивати методи математичного моделювання процесів, що мають місце, зокрема методу очищення розплаву від неметалічних включень в проміжному ковші [3].

В п. 1.1 представлено аналітичний огляд особливостей конструкції проміжного ковша, пов'язаних з ним технологічних процесів і заходів, що вживаються під час проєктування та експлуатації цього металургійного агрегату.

В п. 1.2 виконано аналітичний огляд та систематизацію існуючих на даний час підходів до моделювання та вивчення процесів, що є об'єктом дослідження дисертаційної роботи. За результатами аналізу були прийняті рішення з вибору методів, що використовуються у дисертаційній роботі.

Основні результати розділу опубліковані в [24].

1.1 Проміжний ківш в сучасній технології безперервного розливання

Проміжний ківш (промковш), як невід'ємна частина виробничої лінії безперервного розливання (рис. 1.1), з розподільного буферного пристрою, що забезпечує сталість напору розплаву, що надходить в кристалізатори МБРЗ [26], перетворився в металургійний агрегат безперервної дії для додаткового позапічного рафінування та підвищення якості сталі [27–32].

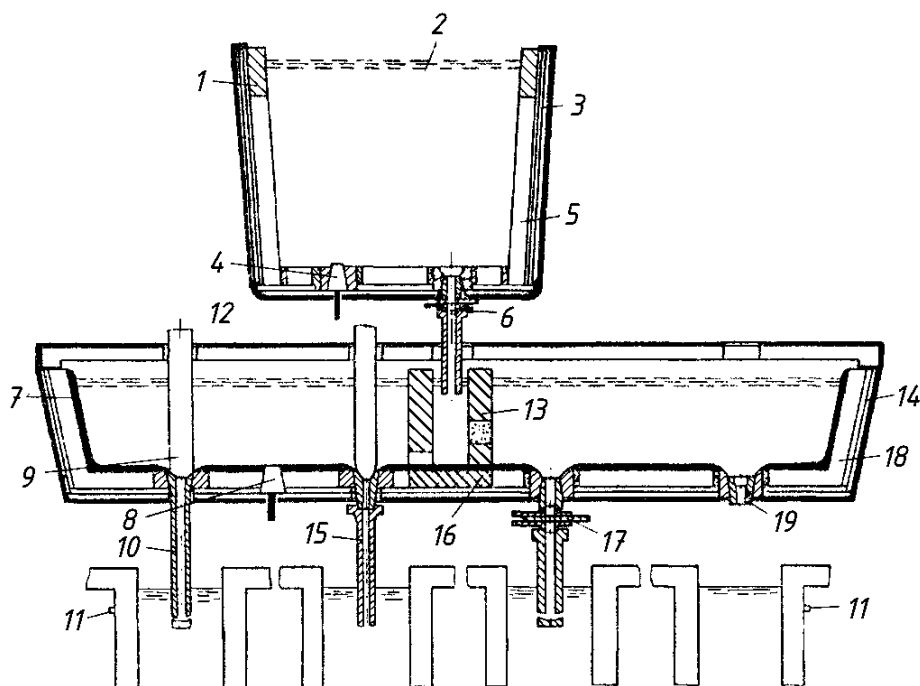


Рисунок 1.1 – Загальне облаштування проміжного ковша в схемі МБРЗ: 1 – зона шлаку; 2 – сталерозливний ківш; 3 – ізоляція; 4 – пристрій для продувки газом; 5 – робочий шар футерування, що зношується; 6 – ковзний затвор із захисною трубою; 7 – захисний шар; 8 – система для продувки газом; 9 – стопор-моноблок; 10 – занурюваний стакан (монолітний); 11 – кристалізатор; 12 – проміжний ківш; 13 – перегородка з керамічним фільтром; 14 – ізоляційний шар; 15 – занурюваний стакан (що складається з двох частин); 16 – опорна плита; 17 – ковзний затвор; 18 – робоче футерування, що зношується; 19 – стакан вільного розливання.

Згідно [3, 4, 25] конструкція сучасних проміжних ковшів характеризується такими особливостями: футеровкою з основних (CaO , MgO) або нейтральних (Al_2O_3) вогнетривів; кришкою для теплоізоляції і зменшення взаємодії з атмосферою; захистом дзеркала металу шлаками помірної основності, продуктами розкиснення з абсорбуючими властивостями; порогами та перегородками для формування потоків металу, які можуть бути додатково оснащені спеціальними каналами, що виконують функцію фільтра; обладнанням для продувки аргоном; обладнанням для обробки реагентами, що

модифікують; нагрівальними пристроями для стабілізації температури металу [33].

При цьому переслідуються наступні цілі [34, 35]: висока стійкість футерування; захист струменя розплаву, що подається з сталерозливного ковша в проміжний, та на вході в кристалізатори; ефективний захист дзеркала металу за допомогою шлакоутворюючих сумішей (ШУС); модифікування і мікролегування сталі; видалення неметалічних включень; гомогенізація розплаву та стабілізація температури на вході в кристалізатори.

Ефективність використання проміжного ковша для перелічених цілей в значній мірі залежить від гідродинамічних потоків [27, 36–42] і, як наслідок, теплових конвективних процесів, що відбуваються в розплаві [43, 44], а значить, від геометрії проміжного пристрою та конфігурації збурюючих факторів (продування тощо).

Розміри і конфігурація проміжного пристрою впливають на інтенсивність циркуляційних потоків [27, 37, 45, 46]. Дані про течії металу в проміжному ковші є основою для його удосконалення. Важливою умовою є достатність часу перебування металу в проміжному ковші для спливання частинок, які мають меншу питому масу, ніж сталь. Зменшення шляху спливання без скорочення часу перебування сталі в промковші є метою регулювання потоків. Елементи, що вбудовуються у порожнину промковшу, повинні сприяти організації режиму рециркуляції розплаву, при якому потік наближається до межі поділу «метал–шлак», а тривалість перебування розплаву в проміжному ковші зростає для кращого виділення домішок. Існує тенденція до збільшення розміру промковша.

Видалення неметалічних включень. До шкідливих домішок, які можуть стосуватися частини технологічного процесу, що розглядається в роботі, і на які необхідно впливати для досягнення кінцевої мети виробництва відносяться: сірка і фосфор [1, 47], складні неметалічні включення змінного складу – сульфід ($\text{Mn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{S}$), нітриди ($\text{Ti}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$), оксиди $((\text{Al}_2\text{O}_3)_x \cdot (\text{SiO}_2)_{1-x})$ [1, 47–50] а також приховані домішки (азот, кисень, водень). У сталях різних

марок допускається не більше 0.06 % вмісту сірки, у вуглецевій сталі – до 0.050 % вмісту фосфору. Азот, кисень і водень погіршують пластичні властивості сталі, їх присутність також обмежується до 10^{-2} – 10^{-4} %.

Початок лиття при заповненні проміжного розливного пристрою і, потенційно, процес позапічної обробки представляють критичні фази, що можуть погіршувати чистоту по оксидам. У подальшому в результаті змішування з чистою сталлю, що надходить з сталювощу, зміст НВ впродовж періоду лиття експоненційно зменшується.

Інтенсивність протікання цих процесів визначається відхиленням від положення рівноваги між розкиснювачем, кальцієм і киснем [2]. В умовах значного перенасичення металу розкиснювачем утворюються скупчення дрібних твердих включень оксиду розкиснювача. У разі нестачі розкиснювача (при підвищеному вмісті кисню) утворюються продукти розкиснення, що перебувають у рідкому стані.

При спільному розкиснюванні металу алюмінієм, манганом та кремнієм [51] утворюються комплексні продукти розкиснювання, що характеризуються низькою температурою плавлення. З урахуванням досить швидкого розподілу розкиснювача з місць пересичення по всьому об'єму рідкого металу створюються умови для утворення твердих оксидних включень і рідких продуктів розкиснювання різної форми, що зветься первинними неметалічними включеннями [2].

В добре відрафінованому, нелегованому металі більша частина вторинних НВ утворюється в процесі кристалізації.

Завдання видалення НВ вирішується шляхом переведення небажаних домішок з металу в шлак і створенням умов, що перешкоджають їх зворотному переходу [5–8].

З кінетичної точки зору екстракція НВ підпорядковується законам масообміну, конвективної та молекулярної дифузії, а також законам переносу речовини, що витягується з твердої в рідку фазу. Рушійна сила переносу цільового компонента – різниця його хімічних потенціалів по фазах [52–55].

Згідно [56–59] основним механізмом видалення неметалічних включень в практиці використання проміжних пристроїв є їх збільшення, переважно завдяки ортокінетичній коагуляції в турбулентних потоках, з подальшим спливанням в покривний шлак великих часток, що утворюються.

Вочевидь, перемішування розплаву в ПК впливає на інтенсивність зазначених процесів. При цьому кількісні оцінки у відомих дослідженнях стосуються впливу середньої дисипації енергії в розплаві на характерний час коагуляції.

Коагуляція домішок обумовлена переважно близькодійчими силами Ван-дер-Ваальса між частинками. Для здійснення процесу коагуляції необхідне достатнє зближення частинок НВ, що може бути забезпечено за допомогою [56, 60, 61]: 1 – броунівського руху; 2 – потоків середовища, що містить включення; 3 – за рахунок градієнтів, що провокуються неоднорідностями розмірів і щільності частинок.

За даними [6] у всьому спектрі розмірів неметалічних включень можна виділити дві характерні ділянки різного фракційного складу, обумовлених процесом розкиснювання і вторинного окиснення, відповідно. При цьому основний обсяг суспензії неметалічних включень відноситься до продуктів процесу розкиснювання і являє собою грубодисперсну суспензію з розмірами частинок порядку 0.1–10 мк і об'ємною щільністю $\sim 10^{15}$ частинок/м³ [2, 6, 58]. У таких суспензіях можливі всі перелічені механізми коагуляції частинок (молекулярно-кінетичний, турбулентний і градієнтний).

Для НВ розміром від 1–3 мк доступна молекулярно-кінетична коагуляція. За даними [62] здатність до градієнтної коагуляції мають частинки розміром понад 3 мк, які при витримці в промковші зростають у розмірі та видаляються відповідно до закону Стокса. Ця закономірність стосується як монодисперсних, так і полідисперсних систем. На перебіг процесу градієнтної коагуляції значний вплив мають розміри включень, їх концентрація, а також відносні швидкості переміщення порцій рідкого середовища, що їх оточує.

В [63] запропоновано модель процесу збільшення розмірів неметалічних включень на основі уявлень про ортокінетичну турбулентну коагуляцію.

Коагуляція призводить тільки до зменшення числа частинок при незмінній концентрації НВ. Частинки, що утворюються знову, мають однаковий розмір.

Найбільш несприятливі умови для видалення НВ виникають в спокійній ванні. В такому випадку швидкість спливання частинок окремих включень $u_{\text{ч}}$ можна описати формулою Стокса або Рибчинського-Адамара [29, 64]. Швидкість підйому включень радіусу $r_{\text{в}}$ за формулою Стокса:

$$u_{\text{ч}} = \frac{2}{9}(d_{\text{ст}} - d_{\text{ч}})\frac{r_{\text{ч}}^2}{\eta} \quad (1.1)$$

за умови повної відсутності перемішування ванни промковша.

Аналіз показує, що за час витримки $t = 10$ хв включення радіусом > 20 мк мають піти повністю, включення радіусом 10 мк – на 20 %, а дрібні частини радіусом < 1 мк практично не видаляються з ванни навіть при великих (> 60 хв) витримках металу.

Неметалічні включення можуть захоплюватися і виноситися до межі розділу «метал–шлак» висхідними потоками металу, викликаними тепловою і вимушеної конвекцією, перемішуванням або кипінням [29, 65, 66]. Досягнувши міжфазної межі зі шлаком, потік відхиляється та знову опускається вниз. При цьому можливі наступні механізми переходу частинок з потоку в шлак: інерційний, зачеплення та дифузний.

Основним механізмом в цьому випадку є дифузійне осадження з турбулентного потоку. Розрахунки показують, що зі зростанням тривалості процесу підвищується ступінь видалення включень. Зі збільшенням радіусу бульбашок різко зменшується ступінь видалення включень середнього і малого розміру. При подальшому підвищенні інтенсивності процесу знижується частка включень, які переходять з висхідного потоку металу в шлак, і збільшується частка включень, що уносяться спадними потоками в глибину ванни.

Флотація зваженої в рідині дисперсної фази спливаючими бульбашками давно відома з хімічних технологій [29, 67, 68]. Неметалічні включення можуть досягти поверхні спливаючих бульбашок, в цьому випадку відбувається їх осадження на міхурі та спільне з ним винесення з розплаву.

Для малого розміру бульбашок має місце потенційне обтікання рідиною. У разі продувки через фурми завдяки великому розміру бульбашок вони спливають в турбулентному режимі обтікання. Для великих бульбашок процеси флотації можуть визначатися одним з таких механізмів: осадженням частинок на поверхні бульбашки в турбулентному потоці, перенесенням у сліду або подовжньою дифузією в ванні, що барботується.

Відповідно до законів фізико-хімічної гідродинаміки можливі наступні види осадження, що відрізняються за механізмом: інерційне, осадження при зачепленні та дифузійне.

У першому випадку під дією сил інерції частка відхиляється від лінії струму до контакту з поверхнею бульбашки. Критерієм інерційного осадження є число Стокса:

$$Sk = \frac{2}{9} \cdot \frac{u d_{\text{ч}} r_{\text{ч}}^2}{\eta R}, \quad (1.2)$$

де u – швидкість спливання бульбашки; $R, r_{\text{ч}}$ – радіуси бульбашки та частинки неметалічного включення відповідно; η – динамічна в'язкість сталі.

Існує мінімальне критичне значення числа Стокса, при якому частинка долає захоплення рідиною і проходить від поверхні бульбашки на відстані, що не перебільшує її власний радіус $r_{\text{ч}}$. Інерційне осадження включень на бульбашку можливо за умови $Sk > Sk_{\text{крит}} = 0.08$.

Якщо знехтувати інерційним ефектом і вважати, що траєкторія частки збігається з лінією струму, контакт з поверхнею бульбашки відбудеться, якщо траєкторія частки проходить на відстані, що дорівнює її радіусу.

В обох випадках до уваги береться наявність граничного шару δ на міхурі. Якщо розміри частинок малі в порівнянні з δ , то наближення потенційної течії є недостатнім. Оскільки при великих числах Рейнольдса Re

товщина граничного шару мала, то частинки розміром $r_{\text{ч}} \ll \delta$ будуть мати значний коефіцієнт дифузії.

Для дрібних включень ($r_{\text{ч}} < 1$ мк) домінуючим механізмом осадження є дифузія з турбулентного потоку; для частинок $r_{\text{ч}} \sim 10$ мк осадження відбувається переважно в результаті зачеплення, для більш великих – внаслідок інерційного відхилення від ліній струму.

Міцність прилипання неметалічного включення (підкладки) до газової бульбашки [29] залежить від різниці тиску газу усередині бульбашки і тиску на неї, що створюється зовнішніми силами. Різниця цих сил, що діють протилежно, становить

$$F = \frac{2\sigma}{r} - \frac{V(\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{г}})}{\pi r_{\text{ч}}^2} g, \quad (1.3)$$

де V – об'єм газової бульбашки, $r_{\text{ч}}$ – радіус підкладки (НВ).

Зі зменшенням радіусу НВ міцність прилипання збільшується. При низьких значеннях міжфазного натягу на межі метал–домішка, властивих включенням з підвищеним вмістом оксидів заліза і марганцю (≤ 500 мДж/м²), частина зіткнень не призводить до захоплення або виносу до поверхні, тобто, видалення включень, або зв'язка «бульбашка–включення» розпадається при підйомі, отже фактичний ступінь видалення включень флотацією нижче прогнозованого.

З метою модифікування та рафінування металу від неметалічних включень, а також гомогенізації температури і хімічного складу рідкого металу, інтенсифікації процесів розкиснення, продування металу інертними газами застосовується поруч з використанням розмежувальних перегородок з фільтраційними елементами [69, 70]. При цьому ефективність обробки розплаву залежить від інтенсивності перемішування фаз, що взаємодіють, фізико-хімічних властивостей сталі та газу, геометричних параметрів ковша та ін.

Ступінь видалення включень в результаті флотації залежить від тривалості барботажу, витрат газу і розміру бульбашок. Великі включення

($r_b = 100$ мк) видаляються майже повністю після 10 хв процесу. Ступінь рафінування металу від включень середнього і малого розміру ($r_b \leq 10$ мк) істотно залежить від розміру бульбашок, бульбашки радіусом > 0.0132 м забезпечують для них слабку ефективність флотації.

Інтенсивне видалення неметалічних включень при штучному перемішуванні продувкою аргоном відзначається в [71]. В результаті продувки аргоном сталі в ковші зміст включень знижувався в середньому з 0.024 % до 0.011 %, причому видалялися переважно включення, багаті глиноземом.

Продувальні пристрої (фурми), що застосовуються для перемішування розплаву в металургійному виробництві в даний час, являють собою пористий, або багатоканальний блок круглого або кільцеподібного перерізу діаметром близько 100–200 мм з ефективним перерізом газопідводу не більше 50–70 % площі перетину фурми, та встановлюються або в днище ковша, або на кінці удаваного стопора, що занурюється в розплав [72–74]. Продування при такому конструктивному виконанні вимагає великих витрат газу, дія якого локалізована в об'ємах розплаву, що знаходяться безпосередньо над фурмою, що суперечить умовам ефективного бульбашкового режиму флотації, що можливий, відповідно до [75], лише при відносно невеликих витратах газу – до 0.65 – 0.7 л/(хв·см²) на поверхні продувального блоку. Крім того велика витрата флотувального газу може призводити до оголення дзеркала металу, коли крім відомих негативних процесів взаємодії розплаву з надковшовою атмосферою і затягування частинок покривного шлаку в об'єм металу ефективність видалення НВ за причини втрати контакту інтенсивних потоків розплаву з міжфазною зоною «метал–шлак» вже не зростає пропорційно витраті [76].

За результатами фізичного моделювання в [77] відзначена тенденція в існуванні граничних обмежень ефективності продувки для окремої фурми, при цьому частка видалених НВ знаходиться в прямій залежності від кількості продувних пробок. З урахуванням даних закономірностей, зваживши на

недоліки загальноприйнятих конструкцій продувних блоків, доцільно використовувати протяжні фурми, що встановлюються у днищі ковша. Таке рішення дає наступні переваги: 1) збільшений переріз плями, на якій відбувається взаємодія потоків розплаву зі шлаковим покриттям, 2) гарантована відсутність пробивання шлакового покриття з оголенням дзеркала завдяки розподілу витрати спливаючого газу на більшу площу перетину, 3) максимально ефективне використання бульбашкового режиму флотації завдяки відсутності областей з високими об'ємними частками газової фази, 4) створення суцільної газової завіси на шляху розплаву до областей гідродинамічного впливу розливних стаканів проміжного ковша.

Екстракція газу з розплаву (деазотування, видалення водню) відбувається переважно при підйомі бульбашок аргону в рідкій сталі (продування аргоном) [67, 68]. Фізично цей процес забезпечується завдяки різниці парціальних тисків азоту, яка у знову утворюваних бульбашок аргону дорівнює нулю. З рідкої сталі азот буде переноситися в бульбашки до тих пір, поки, відповідно до закону Сівертса, парціальний тиск в бульбашці аргону не прийде до рівноваги з вмістом газу в рідкій сталі. Тому що загальний тиск на дні ковша через феростатичний напір високий, лише невелика кількість азоту буде переходити в бульбашки. При підйомі бульбашок феростатичний тиск навколо них падає інтенсифікуючи перенесення азоту з розплаву в бульбашки. Збільшення витрати аргону призводить до значного зниження вмісту азоту.

Крім екстракції газу має місце також зворотний так званий процес абсорбції газу з окремої бульбашки. Перебіг цього процесу істотно залежить від природи газу і рідини. Для опису розподілу газу в металі необхідно визначити загальний потік газу через поверхню розділу фаз метал–газ протягом кожного моменту часу впродовж всього процесу. Загальний потік газу, що надходить в метал, дорівнює різниці між прямим (абсорбційним) і зворотним (десорбційним) потоками. Прямий потік визначається станом поверхні металу і навколишньої атмосфери, зворотний - в основному станом поверхні металу, тобто її температурою і вмістом розчиненого газу на межі

металу, і ускладняється хімічним перетворенням, що зазнає компонент, що розчиняється. Швидкість розчинення різних газів визначається різними стадіями процесу: для легкорозчинних газів визначається конвективною дифузією компонента усередині бульбашки, а в разі важкорозчинних – стадією конвективної дифузії в рідині. Масообмін відбувається на поверхні дотику фаз і інтенсифікується при більш розвиненій поверхні дотику між газом і рідиною.

Слід також зазначити флотацію НВ за допомогою розчиненого газу з утворенням бульбашок на поверхні включень, якій приділено увагу в [78]. Для значної інтенсифікації даного процесу, як і для інтенсифікації процесу екстракції газу з розплаву в цілому, необхідні додаткові заходи у вигляді вакуумування. Технологія вакуумування передбачає малогабаритний проміжний пристрій і технічно погано сумісна з проміжним ковшом.

Принципово відмінним способом видалення найдрібніших включень зі сталі може бути фільтрація керамічними фільтрами [79], однак в умовах безперервного розливання сталі фільтри повинні витримувати без механічного руйнування і корозії всю серію плавов, що розливаються послідовно «плавка на плавку» зі збереженням пропускної та асиміляційної якості.

Процес видалення включень з проміжного ковша з розплавом може бути якісно описаний наступною схемою: 1) спливання включень з об'єму; 2) винесення включень до межі розділу «метал–шлак» висхідними потоками; 3) флотація бульбашками; 4) зтягування включень в глиб ванни спадними потоками металу; 5) коагуляція включень; 6) асиміляція шлаком.

Теплові процеси. Аналізу теплових процесів в проміжному ковші присвячені наступні роботи [43, 44, 80–82]. Втрати тепла рідким металом при роботі металургійного агрегату відбуваються переважно тепловіддачею конвекцією до футеровки агрегату та тепловіддачею випромінюванням і конвекцією від дзеркала металу, вкритого шаром шлаку [83]. Причиною нерівномірності розподілу температури по довжині проміжного ковша є різниця в часі поширення потоків металу від місця їх подачі до центральних і периферійних ділянок [84]. Час поширення порцій металу від місця заливки до

відповідних струменів розливання збільшується в міру підвищення рівня розплаву [84], а також зменшення швидкості розливання [43]. Цей час слабо залежить від вибору місця подачі струменя металу щодо поздовжньої осі промковша.

Технічно зумовлена велика довжина багатоструменевих проміжних ковшів призводить до виникнення в процесі розливання значного перепаду температур (до 30 °C) між центральною частиною і периферією пристроїв [83] внаслідок сильного охолодження потоків металу під час його руху до крайніх струменів. Це змушує завдавати відповідного перегріву сталі на випуску з конвертера та підтримувати різну швидкість витягування заготівлі для вирівнювання температурних умов по різних кристалізаторах. Одним із засобів досягнення рівних умов розливання є облаштування в об'ємі проміжного ковша спеціальних вогнетривких перегородок, які формують потоки [43, 84].

Для сучасних проміжних металургійних агрегатів, близьких до розглянутої в роботі конфігурації (незважаючи на те, що тепловий стан в ПК безумовно впливає на гідродинамічні і масообмінні процеси) для основного робочого циклу, коли має місце близький до сталого стану тепловий розподіл у футеровці та решті периферії разом з відносно невеликим унесенням тепла у вигляді втрат (порівняно з кількістю тепла, що переноситься розплавом через пристрій, коли тепловий градієнт для пристрою не перевищує 2–3 °C), тепловий чинник не є суттєво значущим для оцінки процесів видалення неметалічних включень.

1.2 Огляд існуючих моделей гідродинамічних, теплофізичних і масообмінних процесів в проміжному ковші

Поширений підхід до досліджень динаміки рідкого металу в проміжному ковші – імпульсне введення індикатора з подальшою реєстрацією та аналізом кривих розподілу часу перебування. Для проведення подібних

досліджень необхідно мати фізичну модель проміжного ковша (натурну або водяну), а для подальшої математичної обробки часто використовуються уявлення про ідеалізовані комірки: ідеального змішування і ідеального витіснення [46, 80, 85–94]. Перевагою підходу є досить проста реалізація, незважаючи на те, що такі моделі є переважно статистичними. Їх застосування для інженерних цілей дослідження впливу конструктивних чинників на розподіл часу перебування металу в промковші досить продуктивне в разі секціонованих проміжних ковшів, де є можливість чітко виділити певні об'єми секцій ідеального змішування та ідеального витіснення.

У ряді робіт [44, 80, 81], присвячених гідродинаміці проміжного ковша, враховуються також теплові процеси, в [81] шляхом розрахунку показана значна роль натуральних конвективних потоків у перемішуванні верхніх і нижніх шарів сталі при основних втратах тепла через поверхню ванни і стінки проміжного ковша. Найпростішим і досить ефективним для практичної оцінки інтегральних показників способом аналізу теплових процесів також є метод на основі енергетичних балансових співвідношень та ідеалізованих комірок подібно до [83] та інших робіт вище.

Для моделювання структури потоків в різних агрегатах (зокрема, проміжному ковші) можливе застосування одно- або двопараметричних моделей зі зворотним перемішуванням [85, 95–98]. Ефективні коефіцієнти турбулентної дифузії (коефіцієнти зворотного перемішування) визначаються за кривими реакції моделі або реального проміжного ковша на імпульсне введення індикатора або стрибок температури. Багато завдань, що пов'язані з рафінуванням сталі від НВ, але не пов'язані безпосередньо з теорією турбулентності, можливо вирішити за допомогою таких простих моделей. Зокрема, для аналізу процесів розкиснення в проміжному ковші в [96] використана однопараметрична модель зі зворотним перемішуванням, аналогічний підхід використаний в [97], де розглянуті одно- і двопараметричну моделі потоку в приймальній і роздавальній секції проміжного ковша з розмежувальними перегородками.

Очевидним недоліком коміркових і дифузійних моделей структури потоків є труднощі визначення параметрів (об'єму комірок і ефективних коефіцієнтів дифузії) за конструктивними параметрами проміжного ковша і режиму розливання без стадії фізичного моделювання. Такі моделі вимагають конкретного (ситуативного) феноменологічного (емпіричного) базису.

Можливим шляхом вдосконалення моделей структури потоків є статистична обробка експериментальних даних, спрямована на оцінку залежності характеристик перемішування в ковші від геометричних параметрів і режиму розливання по аналогії з кореляціями, використовуваними для проектування хіміко-технологічних агрегатів [98].

З розвитком методів математичного моделювання найбільш повну та достовірну картину гідродинамічної ситуації в ванні промковша можливо вивчити на математичних моделях, які враховують рівняння механіки суцільних середовищ. Математичні моделі гідродинаміки турбулентних потоків в проміжному ковші задіюють такі рівняння [43, 90, 91, 99]: безперервності; руху в поєднанні з моделлю турбулентності для врахування турбулентної в'язкості; конвективного теплопереносу; конвективної дифузії для опису розподілу домішки (індикатора). Аналізу проблеми турбулентності і окремих питань побудови моделі на базі рівнянь механіки суцільних середовищ буде присвячено розділ 2.

Висновки до першого розділу

Аналітичний огляд наявних досліджень за обраною темою роботи показує, що в технології додаткової обробки металу (сталі) на стадії проміжного розподільного пристрою існують такі проблеми:

- мінімізація кількості неметалічних включень;
- забезпечення стабільного фізико-хімічного складу і режиму надходження розплаву в кристалізатори;

- організація циркуляції і потоків розплаву в проміжному ковші установки безперервного розливання сталі, яка задовольнить вирішення завдання підвищення якості металу;
- формулювання критеріїв оцінки впливу гідродинамічних (кінетичних) чинників на видалення неметалічних включень, стабільність фізико-хімічного складу і режиму надходження розплаву в кристалізатори;
- удосконалення підходів, методів та програм для моделювання та аналізу зазначених процесів, що мають місце в проміжному ковші, з метою якісного прогнозування процесу видалення неметалічних включень та підвищення якості металу.

Поширені підходи до досліджень процесів у проміжному ковші на основі параметричних моделей, що потребують виокремлення комірок ідеального змішування та витіснення або визначення ефективних коефіцієнтів перемішування за відгуком моделі чи реального ковша, дозволяють вирішувати лише окремі завдання, що не пов'язані безпосередньо з теорією турбулентності, мають труднощі визначення емпіричних параметрів (комірок і ефективних коефіцієнтів дифузії), окрім ресурсовитратності вимагають конкретного ситуативного феноменологічного базису і тому не можуть дати концептуального розуміння того, що відбувається у порожнині промковша. Отже, для цілей даного дослідження доцільним буде вибір підходу, що врахує рівняння механіки суцільних середовищ і не матиме виявлених недоліків.

РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЬ ГІДРОДИНАМІЧНИХ, ТЕПЛОФІЗИЧНИХ І МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ У ПРОМІЖНОМУ КОВШІ

Специфіка використання проміжного ковша в сучасній технології безперервного розливання сталі в якості агрегату безперервної дії для додаткового позапічного рафінування та підвищення якості сталі передбачає залучення до процесу виробництва сталі комплексних взаємопов'язаних процесів гідрогазодинаміки, масообміну і теплопереносу в порожнині металургійного агрегату.

Даний розділ присвячений вибору складових моделі, що охоплює процеси, які становлять об'єкт дослідження роботи, яка буде використана у розділах 3 та 4 для дослідження і аналізу 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 проміжному ковші.

У п. 2.1 на основі зібраної інформації про фізичні властивості конструкційних матеріалів, металу, покривного шлаку, газу для продувки, геометричні параметри промковша та технологічні умови під час можливих режимів його роботи зведено фізичну картину предмета дослідження. З урахуванням означеної інформації та висновків аналітичного огляду методів моделювання в розділі 1 зроблено раціональний вибір доцільної моделі, що враховує суттєво турбулентні процеси переносу у розплаві.

У п. 2.2 поставлена модель для дослідження перехідних режимів роботи промковша на початку розливання першої плавки в серії, у останній плавці в серії, при переході розливання з плавки на плавку, при заміні заглибних стаканів на мірних довжинах слябів або заміні проміжного ковша.

У п. 2.3 наведені результати дослідження щодо вибору параметрів і припустимого діапазону режимів дії на розплав, за яких не повинно

спостерігатися очевидного погіршення умов роботи проміжного пристрою через надмірну турбулізацію або виникнення негативних явищ на межі розділу «метал–шлак». З урахуванням отриманих обмежень поставлена математична модель процесів продування аргонном рідкого металу в проміжному ковші МБРЗ.

Пункт 2.4 присвячено узагальненню математичного опису моделі гідрогазодинамічних, теплофізичних та масообмінних процесів, що мають місце у промковші під час додаткової дії на структуру потоків у розплаві.

У п. 2.5 наведена узагальнююча стратегія для чисельного моделювання, керуючись якою будуть поставлені чисельні експерименти в наступних розділах роботи.

Основні результати розділу опубліковані автором в роботах [9, 11, 14, 17, 24].

2.1 Постановка модельної задачі досліджень

Змістовна постановка задачі. Область дослідження – проміжний ківш (рис. 2.1), який становить окремий резервуар [3, 100]. Під вільну поверхню відбувається наповнення його порожнини рідким металом з сталерозливного ковша, а через отвори розливних стаканів донної частини розплав надходить в кристалізатори. У промковші здебільшого підтримується заданий рівень розплаву. Дзеркало металу захищено шлаками помірної основності, що добре абсорбують продукти розкиснення. Для запобігання контакту з киснем навколишнього середовища і теплоізоляції ємності ПК передбачена кришка.

Основними заходами, які сприяють поліпшенню та стабілізації гомогенності і параметрів розплаву на вході в кристалізатор є: поліпшення теплоізоляційних властивостей футерування і шлакової суміші, застосування спеціальних порогів або перегородок з системою каналів для організації потоків металу в порожнині промковша, організація в донній частині ковша пристроїв для продувки аргонном.

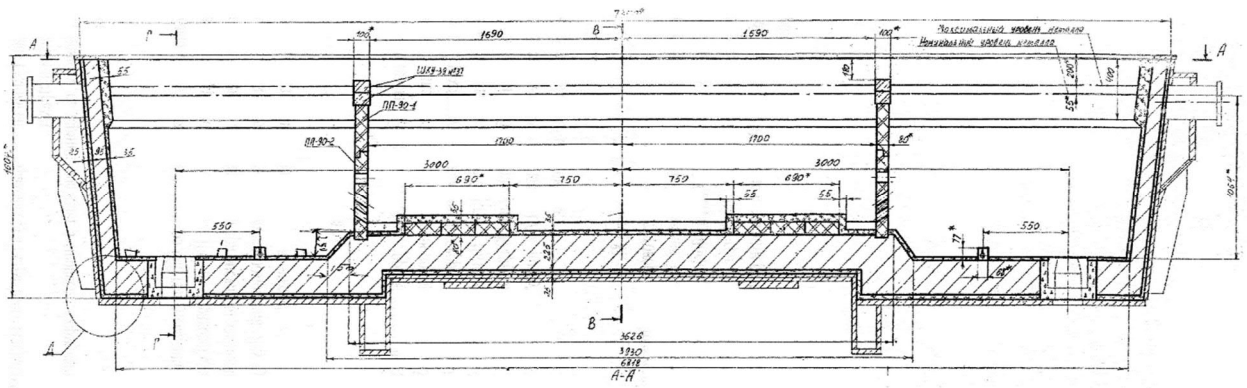


Рисунок 2.1 – Конструкція трисекційного двострумкового проміжного ковша ПАТ МК «Азовсталь».

Рух струменів рідкого металу в порожнині проміжного ковша визначається конструктивними і технологічними параметрами:

- габаритами та внутрішньої топологією (в тому числі наявністю і конфігурацією порогів, перегородок або вставок);
- перерізом захисної труби і розливних стаканів;
- фізичними властивостями розплаву;
- актуальним рівнем розплаву в проміжному ковші;
- масовою витратою розплаву, що надходить з сталерозливного ковша;
- масовою витратою розплаву через розливні стакани;
- динамікою течії розплаву в попередній момент часу.

В даній роботі не будемо розглядати удар струменя об дно промковша, припустимо, що проміжний ківш наповнений розплавом до мінімального рівня перехідних режимів розливання.

Температурний режим роботи промковша визначається:

- температурою розплаву, що надходить з сталерозливного ковша;
- теплофізичними властивостями розплаву, шлаку, газу (в разі продувки), і конструкційних матеріалів проміжного ковша та його кришки;
- початковим розподілом тепла в порожнині і елементах його конструкції;
- тепловою ситуацією середовища, що оточує промковш;
- температурою і витратою газу, що вдмухується;

- динамікою теплових процесів в попередній момент часу.

Формулювання математичної моделі гідродинамічних процесів і процесів тепломасопереносу в проміжному ковші будемо здійснювати за таких фізичних параметрів і припущень:

- розплав надходить через захисну трубу радіусом $R = 0.023$ м з витратою $Q_R = 5368$ кг/хв і швидкістю $V_M < 5$ м/с;
- швидкості і витрати (Q_r) в розливних стаканах визначаються режимом роботи кристалізаторів перерізом 1850×250 мм і витягуванням слябів зі швидкістю 0.8 м/хв [14];
- промковш попередньо наповнений розплавом, фізичні властивості якого відповідають властивостям металу, що розливається, а значення швидкості потоків дорівнює 0 ;
- мінімальний рівень металу в околі захисної труби (в центральній частині ковша або приймальні секції) становить 0.4 м [14];
- межа поверхні розплаву плоска, розташована в діапазоні рівнів $h = 0.4$ – 0.8 м відносно днища центральної частини ковша;
- температура металу, що надходить, дорівнює $T_1 = 1818$ К;
- розглядатимемо розплав як ньютонівську рідину з наперед заданими постійними фізичними властивостями рідкої сталі (щільність $\rho_M = 7200$ кг/м³, коефіцієнт теплопровідності $\lambda_M = 26.5$ Вт/(м·К), теплоємність $c_M = 838$ Дж/(кг·К), кінематична в'язкість $\nu_M = 5 \times 10^{-7}$ м²/с);
- футерування стін виконано з основних (СаО, MgO) або нейтральних (Al₂O₃) вогнетривів, складається з 2-х шарів (1-й шар – шамотна цегла 0.08 м завтовшки; 2-й шар – шамотна цегла 0.1 м завтовшки), властивості яких представлені у таблиці 2.1;
- для продувки застосовується аргон ($\rho_r = 1.7837$ кг/м³ при н.у.);
- для газу, що вдмухується, нехтуємо процесом розчинення в розплаві і припускаємо бульбашковий режим під час руху по всій глибині ванни [22].

Таблиця 2.1

Теплотехнічні властивості вогнетривких матеріалів,
застосованих на МБРЗ №№ 3–5 КЦ ПАТ МК «Азовсталь»

Матеріал	Щільність, г/см ³	Тепло- провідність, Вт/(м·К)	Питома теплоємність, Дж/(кг·К)
DALHIN AM-95/C	0.85	0.11–0.17	775–1230
DALCAST A-701	2.90	1.70–2.40	770–1205
BROLITEX BULK M-O-85	1.45	0.70–0.90	1120–1430

На основі описаних фізичних характеристик матеріалів і процесів, що відбуваються в проміжному ковші, сформулюємо модельні задачі дослідження.

Швидкісні режими і об'єми залученого у взаємодію розплаву припускають наявність інтенсивних турбулентних режимів течії в порожнині проміжного ковша. В даний час для опису турбулентних течій використовують методи, що базуються на вирішенні рівнянь Нав'є-Стокса. Відомі підходи для розрахунку турбулентності можна систематизувати відповідно до структури, показаної на рис. 2.2.

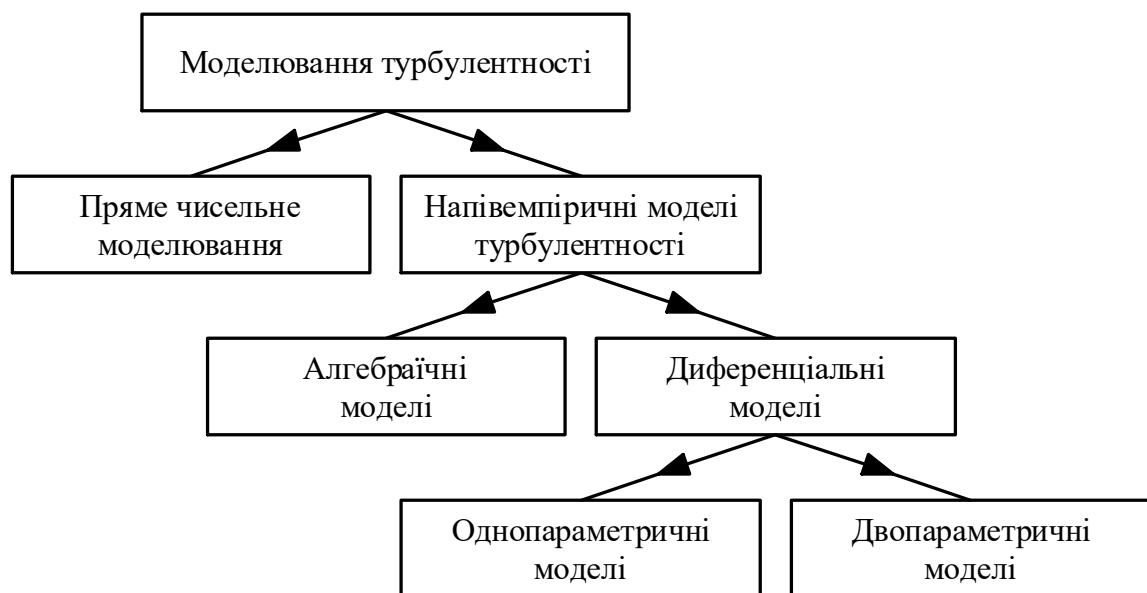


Рисунок 2.2 – До вибору моделі турбулентності.

Моделі з перших принципів аерогідродинаміки [101–104] мають надмірну обчислювальну трудомісткість і обмежену можливість розрахунків для порівняно невеликих чисел Рейнольдса. Лише відносно недавно з'явилися поодинокі спроби застосування прямих чисельних методів (ПЧМ) для моделювання таких складних металургійних агрегатів, як проміжний ківш [105, 106]. Універсальної напівемпіричної моделі турбулентності для замикання рівнянь Рейнольдса, придатної для розрахунку більшості гідродинамічних задач, до теперішнього часу не запропоновано [107], оскільки на формування турбулентності суттєво впливають великомасштабні процеси, що залежать від конфігурації розглядуваної течії [101, 102].

Відповідно до поточного стану задачі моделювання турбулентності та обмежень, що накладаються фізичною моделлю досліджуваних процесів, доцільно вибрати $k-\varepsilon$ модель, яка досить добре відпрацьована, має помірну складність і реалізовується в рамках наявних можливостей обчислювальної техніки. Проведене в роботах [108, 109] порівняння ПЧМ і декількох напівемпіричних моделей стосовно промковша підтверджує актуальність $k-\varepsilon$ моделі для цілей дослідження.

Припустимо плоский плин в проміжному ковші (рис. 2.3). Для цього швидкість метала, що надходить в промковш, виберемо у такий спосіб, щоб дотриматися витрат для кристалізаторів. Для компенсації падіння швидкісних напорів приймемо ефективний переріз труби і розливних стаканів з урахуванням усередненого поперечного розміру промковша $b \sim 1$ м. За початковий стан приймемо стаціонарний рівень металу.

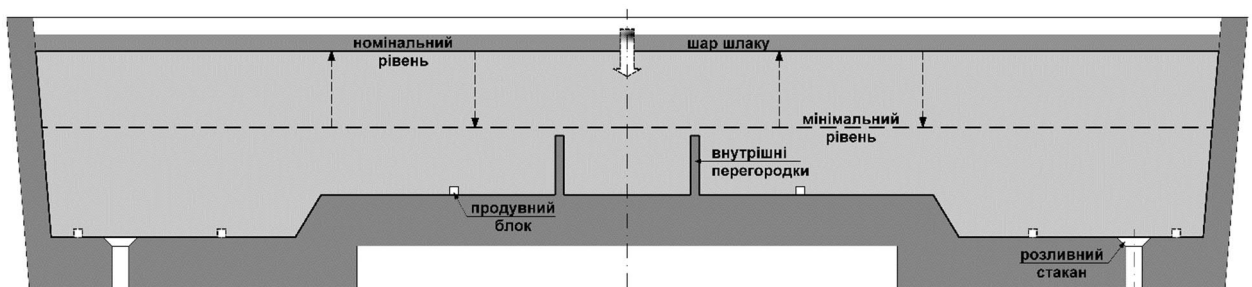


Рисунок 2.3 – Схематичне зображення досліджуваної просторової області.

Для математичного опису руху розплаву в порожнині промковша (рис. 2.3, область Ω_1) запишемо систему рівнянь у наближенні Буссінеска [110]. У векторному вигляді в фізичних змінних маємо наступну систему:

Рівняння Нав'є-Стокса

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \rho \vec{F} - \nabla p + \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_k} \right) \cdot \left[\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right] \right], \quad (2.1)$$

де $\vec{F} = -\vec{g} - k_{\text{ст}} \vec{u}$ – сила, що діє на елементарний об'єм розплаву та враховує інерційний ефект великих за поверхнею бічних стінок; $\vec{g}$ – прискорення вільного падіння; $\vec{u}$ – вектор швидкості течії розплаву, м/с; t – поточний час, с; ρ – щільність розплаву, кг/м³; p – тиск, Н/м²; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с; x, y – поточні координати, м; $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}$ – оператор

Гамільтона; $\Delta = \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ – оператор Лапласа.

Рівняння нерозривності

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0. \quad (2.2)$$

Для обліку турбулентного руху доповнимо систему відповідно обраної k - ε моделі турбулентності рівняннями для кінетичної енергії турбулентного руху

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \rho \vec{u} \cdot \nabla k = \frac{1}{2} \eta_T \left(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right)^2 - \rho \varepsilon; \quad (2.3)$$

та її дисипації

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + \rho \vec{u} \cdot \nabla \varepsilon = \\ = \frac{1}{2} C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \eta_T \left(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right)^2 - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Для вирішення задачі в системі «промковш – розплав» рівняння (2.1)–(2.4) повинні бути доповнені початковими і граничними умовами [110–113].

У початковий момент часу (t_0) припустимо відсутність потоків. 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:

$$\vec{u}_{t_0, \Omega_1} = 0; \quad p_{t_0, \partial\Omega_1} = p_0 \equiv 0. \quad (2.5)$$

З фізичних міркувань на внутрішніх межах стінок промковша ($\partial\Omega_1$) для швидкості діє умова прилипання і непроникності (тангенціальна та нормальна компоненти швидкості дорівнюють 0):

$$\vec{u}|_{\partial\Omega_1} = 0. \quad (2.6)$$

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:

$$\vec{n} \cdot \vec{u}|_{\partial\Omega_1} = 0; \quad p|_{\partial\Omega_1} = 0, \quad (2.7)$$

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

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

$$\vec{n} \cdot \vec{u}|_{\partial\Omega_1} = 0. \quad (2.8)$$

Умови надходження та витікання розплаву вибираються відповідно до фізичної постановки задачі вище:

$$\vec{n} \cdot \vec{u}|_{\partial R_{\text{екв}}} = -u_0; \quad p|_{\partial R_{\text{екв}}} = 0; \quad (2.9)$$

$$\vec{\tau} \cdot \vec{u}|_{\partial r_{\text{екв}}} = 0; \quad p|_{\partial r_{\text{екв}}} = 0, \quad (2.10)$$

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

Одним з параметрів, що характеризують ефективність роботи проміжного ковша, є величина теплових втрат в період розливання. Очевидно, від геометричних параметрів ПК (особливо пропорцій площ поверхонь, через які відбувається унесення тепла з агрегату) залежить його енергетична ефективність. З метою підвищення енергоефективності безперервного розливання проєктуються агрегати підвищеного тоннажу (60–100 тон).

Дано оцінку впливу тоннажу і геометричних пропорцій агрегату на величину теплових втрат розплавом в процесі його роботи у діапазоні змін наведених параметрів з урахуванням наступних припущень:

1. Через незначний нахил бічних стінок промковша в розрахунку приймемо його форму у вигляді паралелепіпеда з еквівалентним об'ємом.
2. Змінні геометричні параметри промковша відповідного тоннажу і стінок зведено в таблиці 2.2.
3. Термічним опором металевого кожуха знехтуємо, тому що його товщина значно менше товщини футерування, а теплопровідні властивості значно кращі, ніж у футерування, припустимо $T_{\text{кож}} \equiv T_{n+1}$.
4. Футеровка проміжного ковша має неоднорідну структуру в залежності від функціонального навантаження стінок, що контактують з розплавом. Структуру шарів наведено в таблиці 2.3.
5. Між окремими шарами стінки забезпечено ідеальний тепловий контакт.
6. Поширення теплового потоку в поздовжніх напрямках стінки не враховуємо в зв'язку з однорідністю режимів підведення тепла на межі контакту з металом і тепловідведення на зовнішній поверхні кожуха для всього промковша.

Таблиця 2.2

Геометричні параметри проміжних ковшів з варійованим поперечним перерізом і висотою рівня розплаву в залежності від тоннажу.

Варіант	Тоннаж, т	Довжина, м	Торець, м	Висота рівня, м
1	40	7	1	0,85
2	60	7	1,5	0,85
3			1	1,3
4	80	7	2	0,85
5			1	1,7

Таблиця 2.3

Структура шарів футерування.

№ п/п	Найменування шару	Товщина шару δ , м
Бічні стінки		
1	шамотна цегла	0.08
2	шамотна цегла	0.1
Торцеві стінки		
1	шамотна цегла	0.08
2	кварцовий пісок	0.1
3	шамотна цегла	0.1
Дно		
1	шамотна цегла	0.08
2	шамотна цегла	0.08
3	шамотна цегла	0.08

У сталому режимі теплові втрати в навколишнє середовище визначаються сумою втрат через всі наявні поверхні

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{днище}} + Q_{\text{біч.ст}} + Q_{\text{тор.ст}} + Q_{\text{шл}}, \quad (2.11)$$

де $Q_{\text{днище}}$, $Q_{\text{біч.ст}}$, $Q_{\text{тор.ст}}$, $Q_{\text{шл}}$ – теплові втрати через поверхні днища, бічних і торцевих стінок, шар шлаку, відповідно, в стаціонарному режимі визначаються через питомий тепловий потік і площу відповідної поверхні

$$Q_i = q_i \cdot S_i. \quad (2.12)$$

Тоді температура розплаву в промковші

$$T_m = \left(T_1 - \frac{Q_{\Sigma}}{c_m M_1} \right), \quad (2.13)$$

де T_1 – температура металу, що розливається, c_m – теплоємність розплаву, M_1 – масова витрата металу через проміжний ківш.

Тепловий потік, що проходить через пласку багат шарову футеровку промковша зі сталим постійним в часі температурним режимом можна

визначити, знаючи товщини шарів футерування та температуру поверхонь стінок і навколишнього середовища. Шукані теплові втрати характеризуються величиною стаціонарного питомого теплового потоку [114]:

$$q_{\text{ст}} = \frac{T_{\text{кл}} - T_{\text{пов}}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2.14)$$

де $T_{\text{кл}}$ – температура внутрішньої поверхні стінки кладки в місці контакту з розплавом; $T_{\text{пов.}}$ – температура навколишнього середовища, $T_{\text{пов}} = 25^\circ\text{C}$; δ_i – товщина шару стінки, м; λ_i – коефіцієнт теплопровідності однорідного шару стінки, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$; α_1 – коефіцієнт тепловіддачі середовища, що віддає тепло, можна прийняти $\alpha_1 = \infty$, α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні стінки в навколишнє середовище (що враховує конвекцію і випромінювання), $\alpha_2 = \alpha_{\text{сер}} = 18,1 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$ при температурі розплаву, що надходить в промковщ, рівній 1539°C . Аналогічно для шлакової засипки.

Розв'язуючи систему рівнянь для теплового балансу

$$\begin{aligned} \frac{1}{\delta_1} \int_{T_2}^{T_{\text{фут}}} \lambda_1(T) dT &= \frac{1}{\delta_2} \int_{T_3}^{T_2} \lambda_2(T) dT = \dots = \\ &= \frac{1}{\delta_n} \int_{T_{\text{кож}}}^{T_n} \lambda_n(T) dT = \alpha(T_{\text{кож}} - T_{\text{сер}}) + c(T_{\text{кож}}^4 - T_{\text{сер}}^4). \end{aligned} \quad (2.15)$$

відносно $T_2, \dots, T_n$, $T_{n+1} = T_{\text{кож}}$ можемо визначити розподіл температури в теплоізоляційних матеріалах (шари стінок, шлаковий покрив) і відповідні питомі теплові потоки:

$$\lambda_{\text{екв}}^{(i)} = \frac{1}{T_i - T_{i+1}} \int_{T_{i+1}}^{T_i} \lambda(T) dT, \quad (2.16)$$

$$q = \frac{\lambda_{\text{екв}}^{(i)}}{\delta_i} (T_i - T_{i+1}). \quad (2.17)$$

Сукупні втрати тепла агрегатом, розраховані відповідно до (2.11), представлені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

Тепловтрати в 40-, 60- і 80-тонному промковші.

Варіант	Тоннаж, т	$Q_{\text{біч.ст, кВТ}}$	$Q_{\text{тор.ст, кВТ}}$	$Q_{\text{днище, кВТ}}$	$Q_{\text{шл, кВТ}}$	$Q_{\Sigma, кВТ}$
1	40	25.579	2.996	21.616	51.918	102.109
2	60	25.579	4.097	29.563	71.005	130.245
3		34.753	4.07	21.616	51.918	112.357
4	80	25.579	5.199	37.51	90.093	158.381
5		43.927	5.145	21.616	51.918	122.606

Сумарна тепломісткість для 40-тонного проміжного ковша $Q_{\text{ПК}} \sim 4,93 \times 10^{10}$ Дж, для 60-тонного $\sim 7,39 \times 10^{10}$ Дж і для 80-тонного $\sim 9,85 \times 10^{10}$ Дж. Оцінімо відносні втрати тепла для цієї серії розрахунків.

Найбільші втрати тепла відбуваються через дзеркало металу, укрите шлаком (див. рис. 2.4). Ці втрати становлять 42–57 % від загальних втрат промковша. З цієї причини для збереження ефективності проміжного ковша енергетично вигідніше збільшувати глибину ванни зі збільшенням тоннажу останнього.

У таблиці 2.5 представлено залежність значень відносних втрат тепла від зміни пропорцій металургійного агрегату. Можна відмітити різницю темпів зростання теплових втрат в залежності від напрямку зміни конфігурації ПК. Червоний колір відповідає найгіршій ситуації, зелений – ситуації з найменшими втратами тепла. Варто також відмітити, що збільшення площі поверхні шлаку разом з погіршенням теплової ефективності повинно призводити до збільшення ефективності асиміляції неметалічних включень останнім. Тож, для остаточного вибору напрямку і відносних значень змінювання пропорцій геометрії промковша, у разі такої потреби, для компромісного вибору робочої площі шлаку слід керуватись сукупністю прямих енергетичних втрат та відсотку відбракування злитків за якістю.

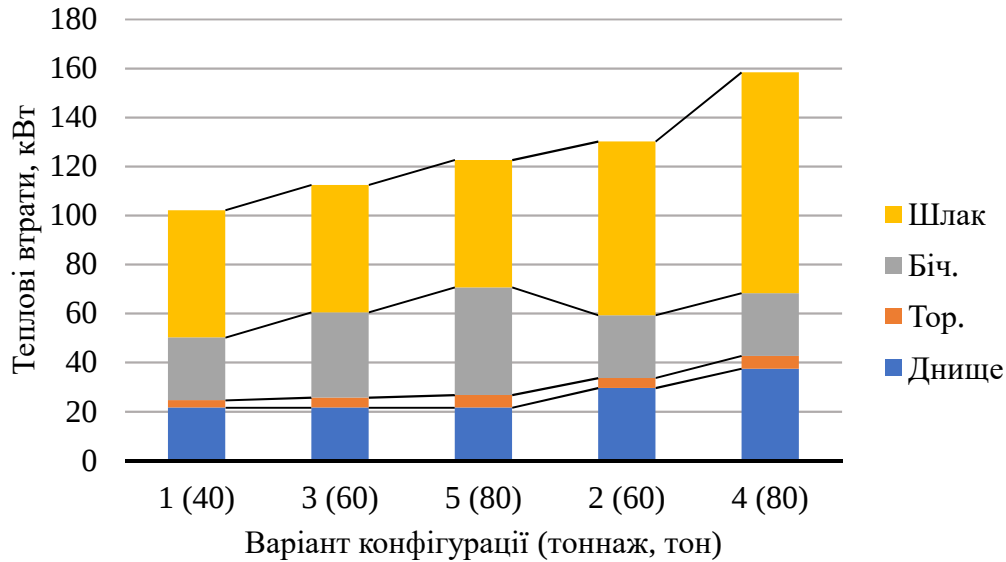


Рисунок 2.4 – Сукупні тепловтрати через зовнішні поверхні і частка тепла, що втрачається, яка припадає на різні поверхні промковша, в залежності від співвідношення геометричних параметрів та відповідного тоннажу проміжного ковша.

Таблиця 2.5

Відносні тепловтрати в 40-, 60- і 80-тонному промковші.

		Тоннаж промковша				Відносні втрати тепла, %				
		Площа шлак. покріву →				Площа шлак. покріву →				
		63%	100%	137%	174%	63%	100%	137%	174%	
Площа бічних стінок ↓	64%	10	20	30	40	0,058	0,083	0,108	0,134	
	100%	20	40	60	80	0,067	0,093	0,118	0,144	
	136%	30	60	90	120	0,076	0,102	0,128	0,154	
	172%	40	80	120	160	0,085	0,111	0,137	0,164	

Отже, загальні теплові втрати 43-тонного проміжного ковша від тепла, що вноситься з металом, що надходить зі сталюковша, становлять

$$\frac{Q_{\Sigma}}{Q_{\text{вн}}} \cdot 100 < 0.093 \%, \quad (2.18)$$

де $Q_{\text{вн}}$ – тепло, що вноситься у промковш свіжими порціями розплаву,

$$Q_{\text{вн}} = c_{\text{м}} M_1 (T_{\text{м}} - T_{\text{сер}}) = 6,62 \times 10^9 \text{ Дж/хв.}$$

Виходячи з відношення втрат до тепла, що вноситься в промковш, різниця температур між новим металом, що надходить до промковша, і металом, що потрапляє до кристалізаторів, не перевищує $2-3^{\circ}\text{C}$ ($\sim 0.15\%$), з чого можна зробити висновок, що в умовах сталого режиму роботи двострумкового проміжного ковша досліджуваних конфігурацій, габаритів та тоннажів тепловий стан не надає суттєвого впливу на гідродинамічні та масообмінні процеси при наявній продуктивності агрегату.

2.2 Гідродинамічні процеси в промковші під час перехідних режимів

До перехідних режимів безперервного розливання слід відносити [115]: пуск МБРЗ (початок розливання першої плавки в серії) і закінчення розливання серії плавок (остання плавка в серії), заміну сталерозливного ковша (перехід розливання з плавки на плавку), заміну заглибних стаканів на мірних довжинах слябів, заміну проміжного ковша.

Найбільш повно цикл можливих динамічних змін рівня розплаву і гідродинамічної ситуації в ньому можна дослідити на процесі зміни сталерозливного ковша (перековшовці), для якого можна виділити три етапи з різною перехідною динамікою:

1. Зменшення подачі розплаву з стальковшу до стану балансу витрат через промковш з подальшою стабілізацією режиму роботи (стаціонарний рівень дзеркала металу);
2. Надходження металу в приймальну секцію з витіканням через фільтраційні канали в розливні секції з однаковими витратами (стаціонарний рівень дзеркала металу);
3. Припинення надходження металу з продовженням витікання в розливні секції після закриття шиберу сталерозливного ковша з подальшою його заміною (опускання рівня дзеркала металу);

4. Надходження металу з сталерозливної витратою, що перевищує його витікання в розливні секції, після відкриття шиберів нового сталерозливного ковша (рівень дзеркала металу підвищується).

Етап 2, після виходу на стаціонарний режим, становить основний робочий стан, відповідний більшій частині часу роботи проміжного пристрою. Рух розплаву з найбільшою інтенсивністю має місце в центральній частині (або приймальній секції промковша, поділеного на декілька секцій). Тому дослідження циркуляційних потоків металу в період перехідних режимів безперервного розливання і їх вплив на відбраковування слябових заготовель і листового прокату, що відливається під час заміни сталерозливного ковша (перековшовки), в першу чергу необхідно проводити для приймальної секції. Додатковий негативний вплив на неоднорідність виявляє ситуація, що має місце для машин безперервного розливання з не осесиметричним розташуванням струменя з сталерозливного ковша, коли має місце циклічна зміна асиметрії в процесі перековшовки.

Робоча зона секціонованого промковша, з розташуванням розливних і приймальної секцій, відокремлених перегородками з фільтраційними каналами, представлена на рис. 2.5, а її опис наведено в роботі [14].

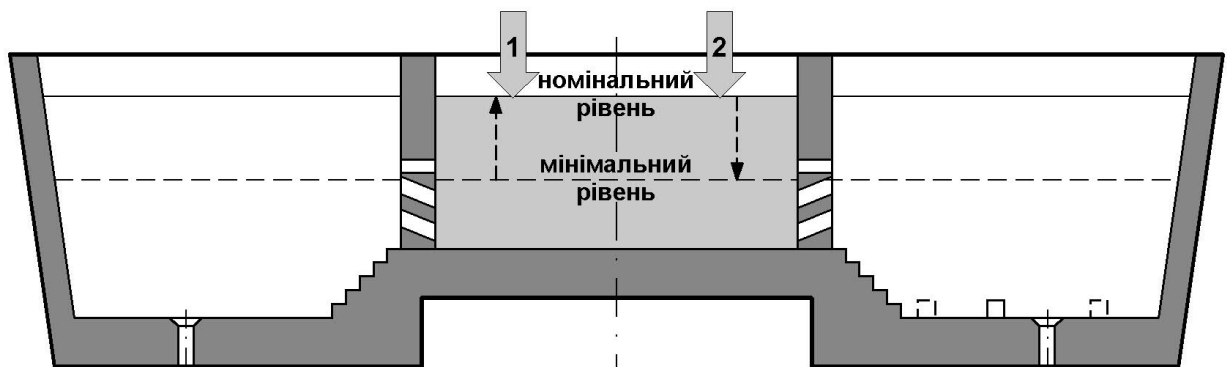


Рисунок 2.5 – Досліджувана область зі схематичним зображенням зміни рівня металу в процесі перековшовки: 1, 2 – положення струменів металу, що надходить з сталерозливного ковша до і після його заміни відповідно.

Для формулювання математичної моделі досліджуваних процесів доповнимо наведені раніше припущення наступними, що додають задачі істотно еволюційний характер:

1. при вирішенні цієї задачі за початкові умови приймаємо параметри роботи системи «сталерозливний ківш – проміжний ківш» в сталому режимі безперервного розливання;
2. швидкість подавання металу з розливного ковша і відповідна витрата розплаву через захисну трубу є змінними в часі функціями етапів перехідного режиму;
3. значення рівня дзеркала металу також є змінною у часі величиною, що змінюється в діапазоні від мінімального до номінального у функціональній залежності від етапів перехідного режиму.

Для вирішення задачі в системі «промковш – розплав» рівняння (2.1)–(2.4) повинні бути доповнені початковими і граничними умовами, що враховують специфіку перехідних режимів.

Початковий момент часу для дослідження перехідного процесу (t_0) відповідає «сталому» вирішенню стаціонарної задачі (тривале виконання етапу 1 і 2 до процесу встановлення). При цьому початкові (2.5) і граничні умови для стінок (2.6) зберігаються.

На вільній поверхні розплаву, що контактує зі шлаком, в залежності від в'язкості останнього, для швидкості вибираються кілька варіантів граничних умов. При цьому нормальна компонента швидкості повинна відповідати швидкості вертикального просування рівня дзеркала металу:

$$\vec{n} \cdot \vec{u}|_{\partial\Omega_1} = u_{\text{дзерк}}(t); \quad p|_{\partial\Omega_1} = 0, \quad (2.19)$$

де $u_{\text{дзерк}}(t)$ – швидкість руху дзеркала металу, м/с.

Для визначення параметрів змінної геометрії (швидкості руху дзеркала $u_{\text{дзерк}}(t)$ і рівня розплаву $h(t)$) систему рівнянь необхідно доповнити парою:

$$\begin{cases} u_{\text{дзерк}}(t) = \frac{\Delta Q(t)}{S_{\partial\Omega_1^*}(h(t))}, \\ h(t) = h_{\text{ном}} + \int_{t_0}^t u_{\text{дзерк}}(t) dt \end{cases}, \quad (2.20)$$

де $\Delta Q(t) = Q_R(t) - Q_r$ різниця витрат металу надходить в ПК і витікає з нього до кристалізаторів, м³/с; $Q_R(t)$, Q_r – витрати розплаву, що надходить і витікає, відповідно, м³/с; $S_{\partial\Omega_1^*}$ – сумарна площа дзеркала металу в проміжному ковші; $h_{\text{ном}}$ – номінальний рівень, що відповідає початковому моменту перехідного режиму, м.

На осі симетрії граничні умови відповідають (2.8).

Умови надходження і витікання розплаву обираються відповідно до фізичної постановки задачі на початку розділу:

$$\vec{n} \cdot \vec{u}|_{\partial R_{\text{екв}}} = -u_0(t) + v_{\text{дзерк}}(t); \quad p|_{\partial R_{\text{екв}}} = 0; \quad (2.21)$$

$$\vec{\tau} \cdot \vec{u}|_{\partial r_{\text{вих}}} = 0; \quad p|_{\partial r_{\text{вих}}} = 0, \quad (2.22)$$

де $\vec{\tau}$ – одиничний вектор дотичної до границі; $\partial R_{\text{екв}}$ – границя еквівалентної захисної труби; $\partial r_{\text{екв}}$ – границя еквівалентних вихідних отворів, які задовольняють витратам розплаву через ПК (Q_R , Q_r) відповідно.

2.3 Процес продування інертним газом та видалення неметалічних включень

Як випливає з аналізу фізичних процесів (розділ 1), продування аргоном рідкого металу в проміжному ковші МБРЗ дозволяє організувати ефективне видалення неметалічних включень з рідкої сталі. Для цього необхідна установка фурми спеціальної конструкції в донній частині проміжного ковша перпендикулярно до його головної осі. В такому випадку організовані з урахуванням висновків розділу 1 газові потоки у вигляді сукупності газових бульбашок, що виконують функцію газової завіси, повинні бути ефективним засобом транспортування рідкого металу в зону розділу «метал – шлак», де

здійснюється процес асиміляції неметалічних включень рідким шлаком. При цьому необхідно забезпечити такі розміри бульбашок аргону, які не будуть затримуватися на межі «метал – шлак» [116].

Оцінка умов барботажного режиму. У роботах [117, 118] проведено широкий аналітичний огляд досліджень з моделювання процесів перемішування у ковшах за допомогою вдування газової фази, розглянуто та систематизовано наявні роботи з повномасштабними моделями, водяними моделями, математичним моделюванням, а також комбіновані дослідження. Згідно аналізу найтипівіша експериментальна ситуація відповідає характерним умовам: $L = \sim 1$ м, $D = \sim 1$ м, $Q_r = 1.1 \sim 4 \cdot 10^{-3}$ м³/с, $T = 298$ К. Як правило, розглядається осесиметричний випадок, коли інформацію про відносну швидкість спливання бульбашок газової фази складно або неможливо відокремити від швидкості наведених циркуляційних потоків у досліджуваній рідині, можна лише дізнатись інтегральних оцінок для енергії що додається у систему з інжекцією газу.

Так званий пробій ванни, який може мати сенс у випадку обробки в сталерозливному ковші або піч-ковші [76], неприйнятний для проміжного розливного пристрою на фінальній стадії виробництва. Отже технологічний ліміт зверху становить умова порушення цілісності покривного шлаку з оголенням дзеркала металу і затягуванням шлаку в розплав.

Згідно з дослідженнями [119] момент переходу від турбулентного режиму до режиму пробою ванни визначається імпульсом струменя, щільністю і в'язкістю розплаву, глибиною ванни. Емпірична формула для оцінки критичної глибини ванни, при якій для даних умов дуття починається пробій:

$$h_{\text{пр}} = 0.12 \sqrt[3]{M_r w_r}, \quad (2.23)$$

де $h_{\text{пр}}$ – глибина шару металу, що пробивається струменем, м; M_r – масова витрата газу, що вдмухується, кг/с; w_r – швидкість газу на зрізі сопла, м/с.

Пробій ванни спостерігається, якщо розрахункова величина $h_{\text{пр}}$ перевищує глибину ванни. При цьому розплав у ванні слабо перемішується

і кількість газо-металевої емульсії невелика. Максимальний кут розкриття струменя при пробі становить 22–25°.

В [75] стверджується, що ефективний бульбашковий режим флотації зберігається при витратах газу до 0.65–0.7 л/(хв·см²) в перерізі поверхні продувного блоку. Це значення становить верхній технологічний ліміт можливостей інтенсифікації процесу за рахунок абсолютного збільшення витрати газу, що вдмухується. При впорскуванні на високих швидкостях через окремі отвори діаметром d_0 більшим ніж ~0.65 см також відбувається значне утворення газо-рідинних струменів і утворення безлічі бульбашок [120].

Іншим обмеженням, яке становить нижній технологічний ліміт, є умова можливості подолання бульбашками межі розділу «метал – шлак», що обумовлено необхідністю підтримки активної поверхні шлаку в ефективному стані [22]. Невиконання цієї умови може кардинальним чином змінити хід процесів в шлаковому шарі.

Для оцінки максимального радіуса бульбашки, здатної затримуватися на межі розділу можна застосувати формулу [121]:

$$R = \frac{\frac{\rho_m}{4} \cdot \sqrt{\frac{\sigma'_{1-2}}{\rho_m - \rho_\Gamma}} + 2\Delta R \cdot \rho_m - \frac{\rho_\Gamma}{3a} \cdot \sqrt{\frac{\sigma'_{1-2}}{\rho_m - \rho_\Gamma}}}{\frac{2}{3}(\rho_m + \rho_{\text{ш}} - 2\rho_\Gamma)} \pm \sqrt{\frac{\frac{\rho_m}{4} \cdot \sqrt{\frac{\sigma'_{1-2}}{\rho_m - \rho_\Gamma}} + 2\Delta R \cdot \rho_m - \frac{\rho_\Gamma}{3a} \cdot \sqrt{\frac{\sigma'_{1-2}}{\rho_m - \rho_\Gamma}}}{\frac{4}{3}(\rho_m + \rho_{\text{ш}} - 2\rho_\Gamma)}} + \frac{\sigma_{2-3} - \frac{\Delta R \cdot \rho_m}{a} \cdot \sqrt{\frac{\sigma'_{1-2}}{\rho_m - \rho_\Gamma}}}{\frac{1}{3}(\rho_m + \rho_{\text{ш}} - 2\rho_\Gamma)} \quad (2.24)$$

де R – радіус бульбашки, м; ΔR – товщина стінки, що оточує бульбашку, м; ρ_Γ , ρ_m , $\rho_{\text{ш}}$ – щільність аргону, металу і шлаку, кг/м³; σ_{1-2} – величина міжфазного натягу на межі «газ–метал», МДж/м²; σ_{2-3} – величина міжфазного натягу на межі «метал – шлак», МДж/м²; a – коефіцієнт опору середовища ($a \sim 1.3$).

Розрахунки, проведені за формулою (2.24), показують, що бульбашки газу діаметром до 10 мм не володіють достатньою підйомною силою для здійснення роботи переходу через поверхню розділу «метал – шлак», можуть затримуватися на цій межі, внаслідок чого може утворитися прошарок інертного газу, який буде негативно впливати на перебіг фізико-хімічних реакцій, що зумовлюють видалення неметалічних включень з рідкої сталі.

Розглянемо еволюцію газової бульбашки у процесі руху від моменту її зародження до виходу через шар шлаку (рис. 2.6). При цьому передбачається температура газової бульбашки в момент її відриву та на виході з шару шлаку рівною 300 К і 1800 К, відповідно, та абсолютний тиск, рівний величині 1.64 кг/см² (сума атмосферного тиску і тиску стовпа рідкого металу).

Рівняння газового стану для двох зазначених положень бульбашки [122]:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}, \quad (2.25)$$

де V – об'єм газової бульбашки, що дорівнює $\frac{4}{3}\pi R^3$.

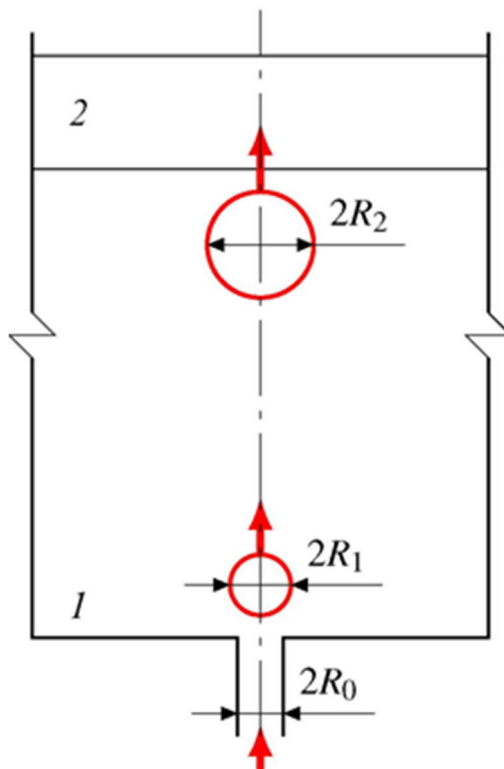


Рисунок 2.6 – Схема розрахунку діаметра одиночного каналу для підведення газу: 1 – метал; 2 – шлак.

Після перетворень отримаємо

$$\frac{P_1 R_1^3}{T_1} = \frac{P_2 R_2^3}{T_2}. \quad (2.26)$$

Зі співвідношення (2.26) можна визначити радіус бульбашки в момент відриву:

$$R_1 = R_2 \sqrt[3]{\frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{T_1}{T_2}}. \quad (2.27)$$

Розрахунки показують, що для діаметра бульбашки в момент проходження через шар шлаку $D_2 = 2R_2$, рівного 10–11 мм, діаметр бульбашки в момент відриву $D_1 = 2R_1$ повинен становити 4.7–5.2 мм.

У процесі формування газової бульбашки на неї діють підйомна сила і конвективні струми, які прагнуть відірвати її від отвору каналу фурми. Цьому перешкоджають сили поверхневого натягу. З урахуванням сказаного можна записати [123]:

$$\frac{4}{3} \pi R_1^3 g (\rho_m - \rho_r) = 2 \pi R_0 \sigma, \quad (2.28)$$

де R_1 – радіус бульбашки в момент відриву від каналу, м; R_0 – радіус отвору підвідного каналу фурми, м; σ – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м; ρ_m , ρ_r – щільність металу і бульбашки аргону, кг/м³.

Із рівняння (2.28) випливає, що

$$d_0 = \frac{4 R_1^3 g (\rho_m - \rho_r)}{3 \sigma}. \quad (2.29)$$

Для поверхневого натягу σ , що дорівнює 0.93 Н/м [124], і діаметра бульбашки, рівного 4.7–5.2 мм в момент відриву, одержуємо величину діаметра підвідного каналу фурми в межах 1.3–1.7 мм. Отже, мінімальний діаметр підвідного каналу фурми, що гарантує проходження бульбашками шару покривного шлаку, дорівнює 1.7 мм.

Оцінку процесу формування газової бульбашки виконаємо виходячи з припущення, що безперервна фаза є застійною, за винятком руху, викликаного потоком дисперсної фази.

Оскільки бульбашка формується потоком газу через спрямований вгору отвір, тиск усередині бульбашки зменшується зі зниженням капілярного тиску $2\sigma/r$ через зсув її центроїда вгору.

Швидкість потоку газу може змінюватися з часом [120]. Якщо між газовим резервуаром і отвором існує обмеження перепаду тиску, наприклад, довгий капілярний канал (тобто коливання тиску внаслідок утворення бульбашок набагато менші, ніж перепад тиску між газовим резервуаром і отвором), – витрату газу можна прийняти постійною.

Якщо об'єм резервуара або «камери нагнітання» вище по потоку від отвору дуже великий у порівнянні з об'ємом утворюваних бульбашок, то зміни потоку газу не будуть істотно міняти тиск в камері. Це відповідає іншому граничному стану утворення бульбашок в умовах постійного тиску, що становить практичний інтерес у разі сітчастих продувних пристроїв та інших розподілювачів з багатьма отворами.

Для проміжних умов між межами постійного потоку і постійного тиску необхідно враховувати об'єм камери. У загальному випадку, утворення бульбашок в отворі є складним явищем.

Оцінка впливу продування на теплові втрати і теплообмінні процеси. Газова фаза, що вдувається у розплав, має температуру помітно нижчу, ніж температура розплаву, що надходить із сталювцю. Враховуючи об'ємні витрати, щільність та теплофізичні властивості аргону, можна очікувати несуттєвий вплив цієї різниці температур на перебіг досліджуваних процесів, значно менший, ніж такий, що зазвичай спостерігається у хімічних технологіях, для яких проведено окремі дослідження теплообміну між газом та рідиною під час процесу продувки, як от наприклад [125]. З'ясуємо значимість цього процесу у разі промковша в діапазоні визначених витрат аргону.

При масовій швидкості надходження металу 5368 кг/хв [14, 15] тепло, що вноситься в проміжний ківш з новими порціями розплаву становить $Q_m = 6.62 \times 10^9$ Дж/хв (див. п. 2.1). Для газу, який вдмухується з об'ємною

витратою 6 м³/год (при нормальних умовах) на один продувний блок [22] тепло, що поглинається з розплаву, становить $Q_{Ar} = 2.8 \times 10^5$ Дж/хв. Отже, внесок в теплові втрати зазначеного об'єму газу, що вдмухується в ванну проміжного ковша, незначний і не перевищує

$$\frac{Q_{Ar}}{Q_M} \cdot 100 < 0.004 \%$$

від тепла, що вноситься в промковш металом, який надходить зі сталерозливного ковша, або

$$\frac{Q_{Ar}}{Q_{\Sigma} + Q_{Ar}} \cdot 100 < 4.4 \%$$

від сукупних тепловтрат для 40-тонного промковша.

Для визначення теплообмінних процесів на межі «газова бульбашка – рідкий розплав» потрібно знати швидкість виринання і час перебування бульбашки в розплаві. В роботах [64, 78, 117, 120, 126, 127], автори за результатами наявних емпіричних досліджень розглянули окремі області, для яких встановлено різні розрахункові співвідношення для газових бульбашок діаметром від 0 до 20 мм (цей інтервал значень відповідає розмірам газових бульбашок, що відриваються від фурми на дні промковша). Це дозволило визначити формулу для розрахунку швидкості спливання бульбашки:

$$v_r = \begin{cases} 0.1g^{0.82} \left(\frac{\rho_M}{\mu_M} \right)^{0.639} d^{1.459}, & d < 2\text{мм} \\ \left(2.14 \frac{\sigma_{Fe}}{\rho_M} + 0.505gd \right)^{0.5}, & d \geq 2\text{мм} \end{cases}, \quad (2.30)$$

де d – діаметр бульбашки; g – прискорення вільного падіння; ρ_M – щільність металу; μ_M – в'язкість розплаву сталі; σ_{Fe} – поверхневий натяг.

На рисунку 2.7 представлено побудований графік залежності швидкості спливання газових бульбашок в залежності від їх діаметру. Діапазон бульбашок 9–19 мм відповідає найпоширенішій ситуації в промисловій практиці, коли швидкості спливання бульбашок знаходяться в межах

0.33–0.43 м/с, в нашому випадку розрахунковий діапазон діаметрів бульбашок від $d_1 \sim 5$ мм до $d_2 \sim 11$ мм. Слід відзначити, що розподіл області на 4 зони не можна вважати природним відображенням механізму спливання бульбашки в даному середовищі без аналізу змін геометрії та динаміки обтікання для окремих бульбашок в залежності від їх розміру.

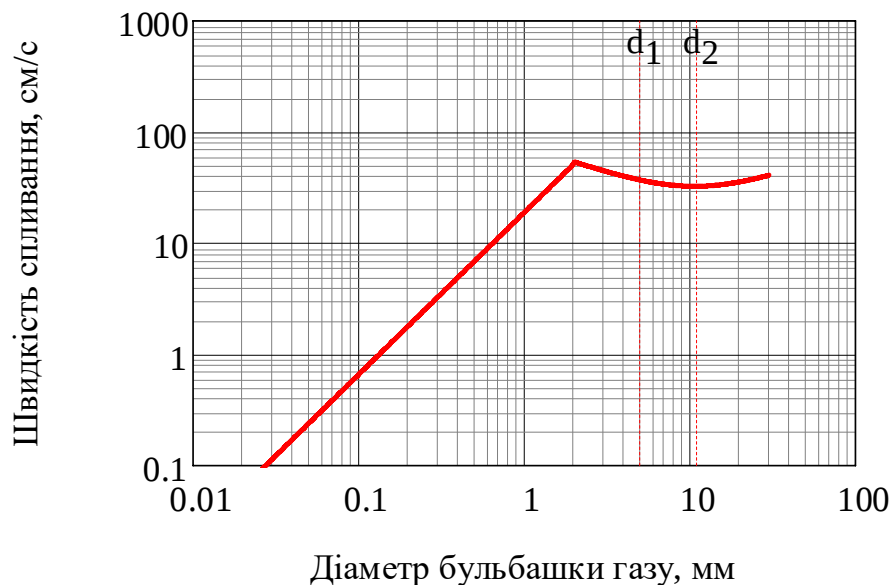


Рисунок 2.7 – Швидкість спливання газової бульбашки в розплаві в залежності від її діаметру за результатами експериментальних досліджень [117, 120], що відповідає (2.30).

Відповідно до визначеного режиму формування бульбашкового режиму продувки за формулою (2.30) визначена відносна швидкість спливання газової бульбашки 0.23 м/с, яка узгоджується з експериментальними дослідженнями, наприклад [114], де швидкість спливання визначена 0.3 м/с.

Знання швидкості спливання бульбашки у ванні промковша дозволяє визначити час її перебування в розплаві. Для ванни промковша глибиною 0.85 м без урахування впливу конвекції ця величина дорівнює 4 с.

Для оцінки часу нагріву бульбашки газу, що спливає у розплаві, скористуємося наступною математичною моделлю. Виділимо сферичний об'єм (процес вважаємо симетричним) в розплаві радіусом 0.3 м. На границі

цієї сфери задаємося умовою на нескінченності. Оскільки в даному випадку температура змінюється тільки в напрямку радіусу кулі, то диференціальне рівняння теплопровідності в сферичних координатах набуває вигляду:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (2.31)$$

Початкові умови в розплаві $T_0 = 1539^\circ\text{C}$, в газовій бульбашці – 20°C . Припускається, що процес спливання настільки короткочасний, що на границі виділеного об'єму розплаву температура не встигає змінитись. В центрі бульбашки – умова симетрії. Особливу увагу слід приділити умові на межі «розплав – газове середовище» (передбачається, що під час нагрівання об'єм бульбашки не встигає розширитися). Тут можливо розглянути два варіанти:

- (перший) контакт між розплавом і оболонкою бульбашки ідеальний:

$$\lambda_m \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_m = \lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_r, \quad T|_m = T|_r; \quad (2.32)$$

- (другий) передача тепла від розплаву до газової оболонки здійснюється за допомогою випромінювання:

$$\lambda_m \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_m = \lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_r, \quad \lambda_m \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_m = -\alpha(T_m - T_r), \quad (2.33)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі [128]:

$$\alpha = 0.186 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^3. \quad (2.34)$$

Розрахунок показує, що прогрів порожнини газової бульбашки здійснюється за 0.001 с при ідеальному контакті, і за 0.00005 с випромінюванням (рис. 2.8).

Отже, можна вважати, що газова бульбашка досліджуваного радіусу прогрівається в порожнині ванни промковша практично миттєво ще під час формування на продувному блоці і навіть локально майже не впливає на теплову обстановку в довколишньому розплаві. При моделюванні процесу теплообміну в системі «розплав – газова бульбашка» необхідно враховувати теплообмін випромінюванням.

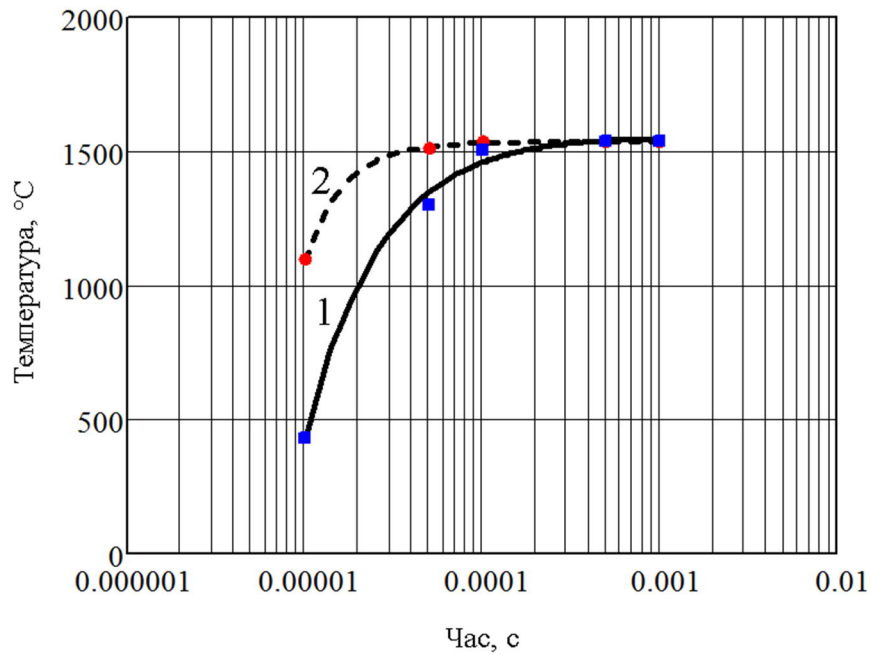


Рисунок 2.8 – Швидкість прогріву газової бульбашки через контакт з розплавом (1) та випромінюванням (2).

2.4 Узагальнена математична модель гідродинамічних, теплофізичних і масообмінних процесів в проміжному ковші

Зведемо розглянуті вище процеси, які відбуваються в проміжному ковші, в систему з єдиним формалізованим описом. Для математичного опису конвективних процесів в розплаві з урахуванням теплообміну модифікуємо рівняння переносу імпульсу з п. 2.2 за допомогою наближення Буссінеска [110].

Рівняння Нав'є-Стокса

$$\rho_{эфф} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho_{эфф} (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \rho_{эфф} \vec{F} - \nabla p + \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_k} \right) \cdot \left[\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right] \right], \quad (2.35)$$

де $\vec{F} = -\vec{g} - k_1 \vec{v}_r \beta - 2k_{ct}/b \cdot \vec{u}$ – сила, що діє на елементарний об'єм розплаву, яка залежить від його відносної ваги ($\vec{g}$) і об'єму залученої в рух з бульбашками приєднаної маси ($k_1 v_r \beta$), а також враховує інерційний ефект

бічних стінок ($2k_{\text{ст}}/b \cdot \vec{u}$); $\rho_{\text{эфф}} = \rho_{\text{жс}}(1 - \beta) + \rho_{\text{г}}\beta$, $\rho_{\text{жс}}$, $\rho_{\text{г}}$ – щільність досліджуваного середовища, рідини і газу, що вдмухується; β – об'ємна частка газової фази. Через відносно невеликий перепад температур розплаву ($\sim 3^\circ\text{C}$) на ділянці проміжного ковша і значну інтенсивність вимушеної конвекції впливом теплового розширення розплаву на гідродинаміку нехтуємо.

Рівняння нерозривності

$$\frac{\partial \rho_{\text{эфф}}}{\partial t} + \text{div}(\rho_{\text{эфф}} \cdot \vec{u}) = 0. \quad (2.36)$$

Рівняння для частки газової фази

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} + (\vec{u}_{\text{г}} \cdot \nabla) \beta = R + \nabla(D_{\text{эфф}} \nabla \beta). \quad (2.37)$$

де $D_{\text{эфф}}$ – коефіцієнт турбулентної дифузії аргону до розплаву; $\vec{u}_{\text{г}}$ – швидкість руху газової фази, її вертикальна складова для даного рівняння $v' = v + v_{\text{г}}$; $v_{\text{г}}$ – відносна швидкість спливання бульбашок в рідкому середовищі [117, 120], визначається за (2.30); в області продувного блоку діє джерело газової фази

$$R = \frac{q}{V_0} \frac{T_{\text{м}}}{273}, \quad (2.38)$$

де q – витрата газу через продувний блок; V_0 – характерний об'єм зони формування барботажного потоку, $T_{\text{м}}$ – температура металу.

Рівняння теплопереносу (в консервативній формі)

$$c_{\text{м}} \rho_{\text{эф}} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-\lambda_{\text{м}} \nabla T + c_{\text{м}} \rho_{\text{эф}} T \vec{u}) = Q, \quad (2.39)$$

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

Для врахування турбулентного руху система доповнюється рівняннями k – ε моделі турбулентності для кінетичної енергії турбулентного руху

$$\rho_{\text{эф}} \frac{\partial k}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \rho_{\text{эф}} \vec{u} \cdot \nabla k = \frac{1}{2} \eta_T \left(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right)^2 - \rho_{\text{эф}} \varepsilon \quad (2.40)$$

і її дисипації

$$\begin{aligned} \rho_{\text{ef}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + \rho_{\text{ef}} \vec{u} \cdot \nabla \varepsilon = \\ = \frac{1}{2} C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \eta_T \left(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right)^2 - \rho_{\text{ef}} C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}. \end{aligned} \quad (2.41)$$

Для розв'язання системи рівнянь в системі «промковш – розплав» рівняння (2.35) – (2.41) доповнюються початковими і граничними умовами.

У початковий момент часу (t_0) передбачається відсутність потоків і однорідний розподіл температури розплаву, котра дорівнює температурі заливання ($T_1 = 1818 \text{ K}$). 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:

$$\vec{u}_{t_0, \Omega} = 0; \quad P_{t_0, \partial\Omega} = P_0 \equiv 0; \quad T|_{t_0, \Omega} = T_1; \quad T|_{t_0, \Omega} = T_2. \quad (2.42)$$

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

$$\vec{u}|_{\partial\Omega} = 0. \quad (2.43)$$

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:

$$\vec{n} \cdot \vec{u}|_{\partial\Omega} = 0; \quad P|_{\partial\Omega} = 0, \quad (2.44)$$

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

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

$$\vec{n} \cdot \vec{u}|_{\partial\Omega} = 0; \quad \vec{n} \cdot (-\lambda_m \nabla T)|_{\partial\Omega} = 0; \quad \vec{n} \cdot (-D_{\text{ef}} \nabla \beta)|_{\partial\Omega} = 0. \quad (2.45)$$

Для (умовно) зовнішніх стінок та днища проміжного ковша ($\partial\Omega$) задані умови конвективної віддачі тепла навколишньому середовищу ($T_{\text{ср}} = 303 \text{ K}$)

$$\vec{n} \cdot (-\lambda \nabla T)|_{\partial\Omega} = q_{\text{бiч}} = \frac{\lambda_{\text{бiч}}}{\delta_{\text{бiч}}} (T - T_{\text{ср}}), \quad (2.46)$$

$$\vec{n} \cdot (-\lambda \nabla T) \Big|_{\partial \Omega} = q_{\text{днище}} = \frac{\lambda_{\text{днище}}}{\delta_{\text{днище}}} (T - T_{\text{сер}}), \quad (2.47)$$

де $\lambda_{\text{біч}}$, $\lambda_{\text{днище}}$ – еквівалентні коефіцієнти теплопровідності стінок та днища;
 $\delta_{\text{біч}}$, $\delta_{\text{днище}}$ – товщини стінок та днища ПК відповідно.

Для вільної поверхні розплаву тепловіддача через шар шлаку:

$$\vec{n} \cdot (-\lambda \nabla T) \Big|_{\partial \Omega} = \frac{\lambda_{\text{шл}}}{\delta_{\text{шл}}} (T - T_{\text{сер}}) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{сер}}^4), \quad (2.48)$$

де $\lambda_{\text{шл}}$ и $\delta_{\text{шл}}$ – коефіцієнт теплопровідності і товщина шару шлакового покриву 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:

$$\vec{n} \cdot \vec{u} \Big|_{\partial R_{\text{екв}}} = -u_0(t) + v_{\text{дзерк}}(t); \quad p \Big|_{\partial R_{\text{екв}}} = 0; \quad T \Big|_{\partial R_{\text{екв}}} = T_1; \quad (2.49)$$

$$\vec{\tau} \cdot \vec{u} \Big|_{\partial r_{\text{екв}}} = 0; \quad p \Big|_{\partial r_{\text{екв}}} = 0; \quad \vec{n} \cdot (-\lambda \nabla T) \Big|_{\partial r_{\text{екв}}} = 0, \quad (2.50)$$

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

2.5 Стратегії моделювання

В роботі розглядається кілька задач, що вимагають різного підходу до чисельного моделювання. На основі сформульованих в цьому розділі математичних моделей реалізовувалися кінцево-різницеві уявлення нелінійних диференціальних рівнянь. Для чисельного моделювання перехідних режимів використані наступні розрахункові методи: інтегро-інтерполяційний, ітерацій і метод змінних напрямків. Для оцінки турбулентної кінетичної енергії і аналізу впливу процесу продувки обрано застосування варіаційного методу скінченних елементів. Всі обчислювальні експерименти з аналізом досліджуваних процесів, що є предметом аналізу у наступних главах проводилися на персональних комп'ютерах з використанням спеціально

розробленого програмного забезпечення, написаного мовою Object Pascal з використанням інтегрованих середовищ розробки Delphi та Lazarus, а також прикладного програмного забезпечення COMSOL та FreeFEM++.

У всіх випадках, за винятком моделювання перехідних режимів, застосовувалася схема, зображена на рис. 2.9, коли необхідність вирішення маршової задачі до моменту усталення визначалася неможливістю збіжності стаціонарної задачі із застосуванням ітераційних методів на конкретній конфігурації розрахункової області.

Перехідні режими передбачають необхідність вирішення маршової задачі зі змінним рівнем в промковші. Розрахунок гідродинамічних і теплофізичних процесів в проміжному ковші при безперервному розливанні сталі має наступний алгоритм:

- Досліджувана область течії вкривається кінцево-різницевої сіткою. Кінцево-різницеве рішення буде визначатися в вузлах сітки.
- Розв'язання починається з того, що у всіх вузлах сітки на момент часу ($t = 0$) ставляться початкові умови. Так як в задачі не розглядається початковий етап наповнення проміжного ковша, ці початкові умови відповідають ідеалізованої ситуації: температура розплаву має однорідний розподіл у всьому об'ємі промковша і дорівнює температурі розливання, розплав знаходиться в спокої.
- Далі починається обчислювальний цикл для наближеного визначення величин у всіх внутрішніх і граничних точках розрахункової області з використанням кінцево-різницевого аналога системи диференціальних рівнянь теплопереносу. Нові значення обчислюються на новому часовому шарі ($+ \Delta t$), що відповідає збільшеному часу, ґрунтуючись на значеннях попереднього часового шару.
- Далі починається обчислювальний цикл, розв'язання системи диференціальних рівнянь змішаної конвекції (2.35) – (2.41).
- Обчислення повторюються до досягнення характерного часу процесу безперервного розливання до наступної зміни стальковшу.

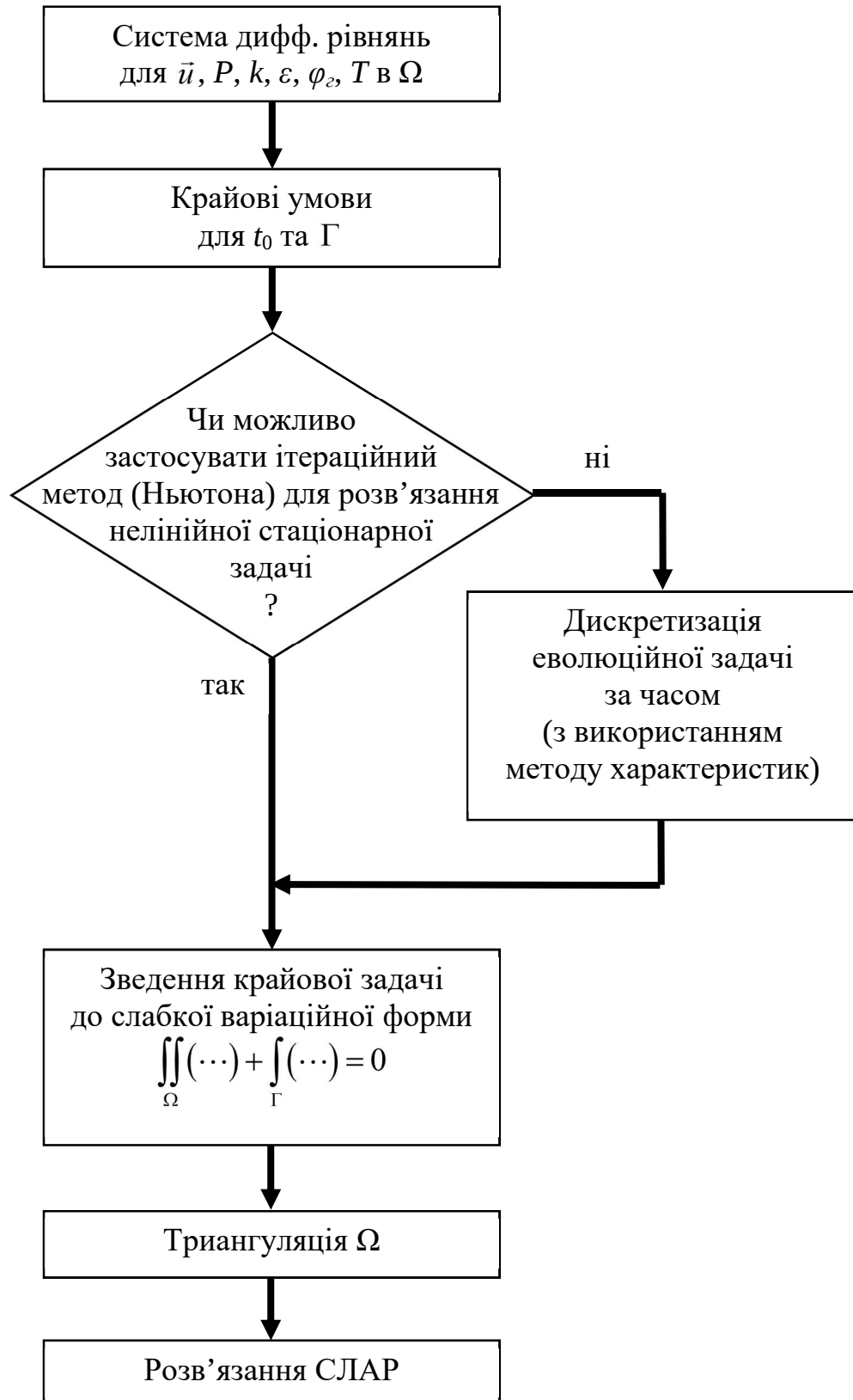


Рисунок 2.9 – Узагальнена схема чисельного моделювання.

Висновки до другого розділу

На основі механізмів руху газових бульбашок в розплаві сталі поставлена математична модель гідродинамічних та тепломасообмінних процесів в проміжному ковші, що дозволяє аналізувати процес обробки розплаву із застосуванням продувки аргоном.

Модель заснована на системі рівнянь переносу у наближенні Буссінеска та $k-\epsilon$ моделі турбулентності і включає рівняння Нав'є-Стокса, нерозривності, об'ємної частки газової фази, теплопереносу, кінетичної енергії турбулентного руху та її дисипації з початковими та граничними умовами і дозволяє досліджувати можливі режими продувки, що відповідають бульбашковому режиму спливання газової фази.

Для обліку взаємодії газової фази з розплавом металу у рівняння переносу імпульсу та об'ємної долі газової фази для бульбашкової газорідинної вимушеної течії введені члени взаємного конвективного руху з джерелом газової фази в околі продувного блоку у якості альтернативного способу інжекції газової фази у рідину. Таке рішення, на відміну від типового застосування для цього граничних умов, дозволило дотримуватись точної витрати аргону в усьому діапазоні досліджуваних режимів продувки при непорушені умов наближення суцільного середовища, необхідного для використаного у моделі способу розрахунку долі газової фази бульбашкової продувки рівнянням конвективної дифузії.

Для дотримання актуальних швидкісних режимів в околах ділянок надходження та витоку розплаву одночасно з дотриманням актуальної витрати металу через промковш за умов ідеалізованої репрезентації геометрії пристрою у поставленій модельній задачі граничні умови коригуються під ефективний перетин струменя, що надходить з стальковша, та струменів, що покидають проміжний ківш через розливні стакани (або канали приймальної секції промковша).

Окрім того поставлена модель враховує інерційний ефект великих за поверхнею бічних стінок, що паралельні площині області розрахунку за допомогою уведення у відповідні рівняння переносу імпульсу спеціальних членів з функцією джерела збурення.

Для забезпечення дослідного бульбашкового режиму продування ванни проміжного ковша при дотриманні умов повного виведення через шар шлаку всього об'єму газової фази, що досягає межі «метал – шлак», діаметр бульбашок в момент проходження через шар шлаку повинен бути рівним 10–11 мм, що в свою чергу може бути забезпечено, якщо в момент відриву від отвору продувного блоку діаметр бульбашки становитиме 4.7–5.2 мм. Для продувки аргоном розплаву сталі такі умови потребують фурму з підвідними каналами діаметром 1.3–1.7 мм. Тобто, діаметр підвідного каналу фурми 1.7 мм гарантує проходження бульбашками шару покривного шлаку, що є запорукою підтримки всієї площі межі контакту шлаку з металом в активному для асиміляції неметалічних включень стані.

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В СТАЛИХ І ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ ПРОМКОВША

В даному розділі розглядаються гідродинамічні аспекти формування струменевих течій в порожнині проміжного ковша в залежності від його внутрішньої конфігурації і вбудованих елементів. Увага приділена структурі течій при відсутності будь-якої додаткової обробки чи дії на розплав окрім можливого впливу конфігурації вбудованих елементів на вимушену конвекцію в порожнині промковша.

Дослідження циркуляційних потоків металу проводилися методом математичного моделювання стосовно моделі 43-тонного проміжного ковша двострумкової слябової МБРЗ конверторного цеху ПАТ МК «Азовсталь». Конструкція проміжного ковша описана в другому розділі. У п. 3.1 з метою підтвердження можливості поставленої моделі достовірно відображати характер плинину рідини в умовах промковша проведено порівняння характеру плинину за результатами чисельного моделювання з використанням поставленої у розділі 2 математичної моделі та результатами фізичного моделювання з використанням індикаторів, що виконані іншими авторами.

У п. 3.2 розглянуто закономірності, що мають місце в динаміці потоків розплаву в залежності від внутрішньої конфігурації промковша. Основна увага приділена впливу конструкційного елемента, що відбиває потоки, обмежуючи зону інтенсивних процесів довкола затопленого струменя, що надходить зі стальковшу. У п. 3.3 дана оцінка можливостей видалення неметалічних включень при визначених закономірностях руху розплаву.

У п. 3.4 наведені результати дослідження перехідних режимів роботи промковша та аналіз їх негативного впливу на забрудненість готової сталі.

Основні результати розділу викладені у наступних публікаціях [14, 18, 24].

3.1 Перевірка адекватності поставленої моделі та отримуваних результатів чисельного моделювання процесів в проміжному ковші

Для перевірки адекватності поставленої моделі для задач моделювання процесів, що становлять предмет дослідження даної роботи, необхідно порівняти інформацію про течію, що отримана в результаті чисельного моделювання з даними, отриманими на фізичних моделях проміжного ковша, побудованих з дотриманням умов теорії подібності. Таке порівняння було проведено в [9] та [17].

Характерний розвиток потоків можна візуалізувати при моделюванні на воді з введенням індикатора [67]. При наповненні проміжного ковша розплавом (рис. 3.1) більш розвинена структура внутрішньої зони циркуляції, яка поширюється до периферії промковша. Течія металу, що надходить в промковш, відбувається в придонній області, але стикаючись з індукованим в більш спокійній області на периферії вихором, придонний потік піднімається в приповерхневу область. Рівень розплаву є її визначальним фактором. Розрахунок часу руху розплаву через промковш показує трохи більші значення в порівнянні з даними [84], але без якісних відмінностей.

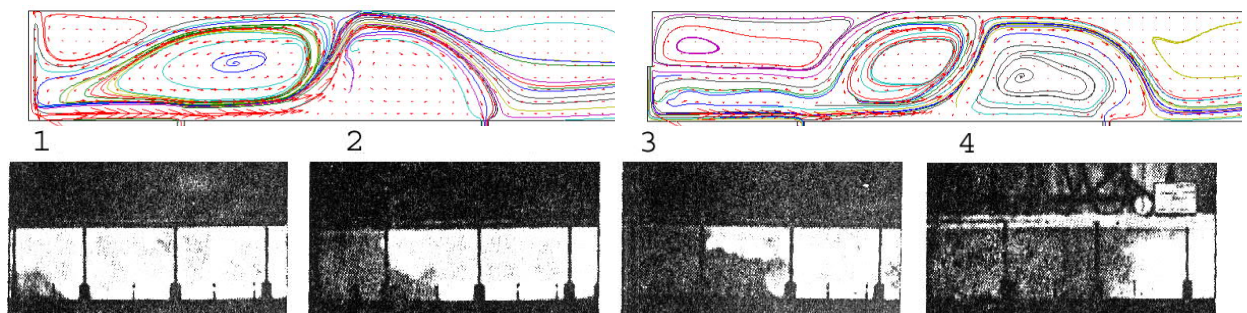


Рисунок 3.1 – Картина потоків промковша при рівні наповнення ($h = 0.6$ м) в тестовій конфігурації і поширення потоків у водяній моделі промковша [67] після підфарбовування.

На рис. 3.2а наведено дані розрахунку траєкторій поширення потоку з оточення перегородки в глибину розливної секції для іншої тестової конфігурації у порівнянні з даними експерименту на водяній моделі (рис. 3.2б) двострумкового промковша з перегородками, виконаного у ФТІМС НАНУ.

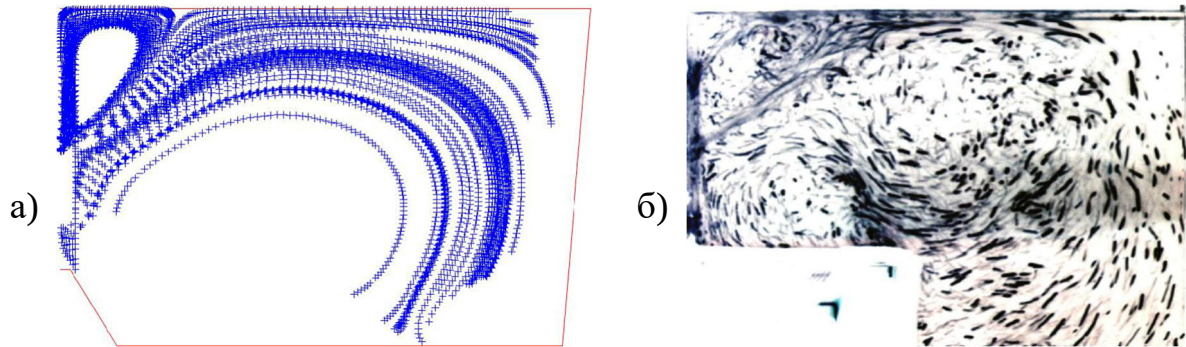


Рисунок 3.2 – Трасування руху потоків від перетічних каналів в порожнині розливної секції: а – за даними тестових розрахунків поля швидкостей; б – за даними експерименту на водяній моделі (інвертоване фотозображення руху бульбашок повітря)

Виходячи з результатів порівнянь обчислюваних даних про течію, що були виконані в [9, 17] можна сказати, що прийнята в роботі модельна задача з усіма супутніми припущеннями дозволяє виявляти актуальну картину усереднених потоків в розплаві з прийнятним рівнем відповідності реальним процесам, що протікають в порожнині промковша.

3.2 Дослідження впливу внутрішньої конфігурації на гідродинамічні процеси в проміжному ковші

В даному розділі розглядаються гідродинамічні аспекти формування струменевих течій в порожнині проміжного ковша в залежності від його внутрішньої конфігурації і вбудованих елементів.

Дослідження циркуляційних потоків металу проводилися методом математичного моделювання стосовно моделі 43-тонного та 63-тонного

проміжних ковшів двострумкової слябової МБРЗ конверторного цеху ПАТ МК «Азовсталь». Конструкція проміжного ковша описана в другому розділі.

Чисельне моделювання гідродинаміки потоків металу виконувалося стосовно розливання сталі в кристалізатори перерізом 1850×250 мм і витягуванню слябів зі швидкістю $0,7\text{--}0,8$ м/хв [15, 18]. Профілі течії розплаву в порожнині проміжного ковша за результатами моделювання представлені на рисунках 3.3–3.4.

Профілі течії на рис. 3.3 відповідають наступним конфігураціям: двострумковому проміжному ковшу без внутрішніх конструктивних елементів, промковшу з типовою вставкою (турбостоп), що обмежує придонну турбулентну ділянку струменя, а також варіантів з варійованим нахилом площини стінок вставки.

У разі резервуара досить великої довжини, що типове для проміжних ковшів, коли один з фізичних розмірів (зазвичай, повздовжній) в кілька разів перевершує поперечний розмір, і товщину шару рідини, в якому мають місце процеси переносу, другий і третій перелічені фізичні розміри мають вирішальний вплив на великогабаритну фрагментацію течії.

Для можливості якісного аналізу динаміки внутрішніх процесів і можливості співставлення різних конфігурацій внутрішньої області промковша виділимо щодо його повздовжнього розміру множину характерних поперечних вертикальних перетинів, для яких у потоків розплаву виявляються ідентичні особливості в більшості досліджуваних ситуацій і дамо їм наступні умовні позначення, які будемо використовувати тут і нижче за текстом:

- $\triangle$ – перетин через центр внутрішньої (I) зони (зворотної) циркуляції;
- $\square$ – перетин через центр зовнішньої (II) зони (прямої) циркуляції;
- $+$ – додатковий перетин в околі характерної (другорядної) неоднорідності потоків;
- $\bigcirc$ – перетин через центр розливного стакану.

На рис. 3.3 лінії перетинів позначені відповідно даної схеми.

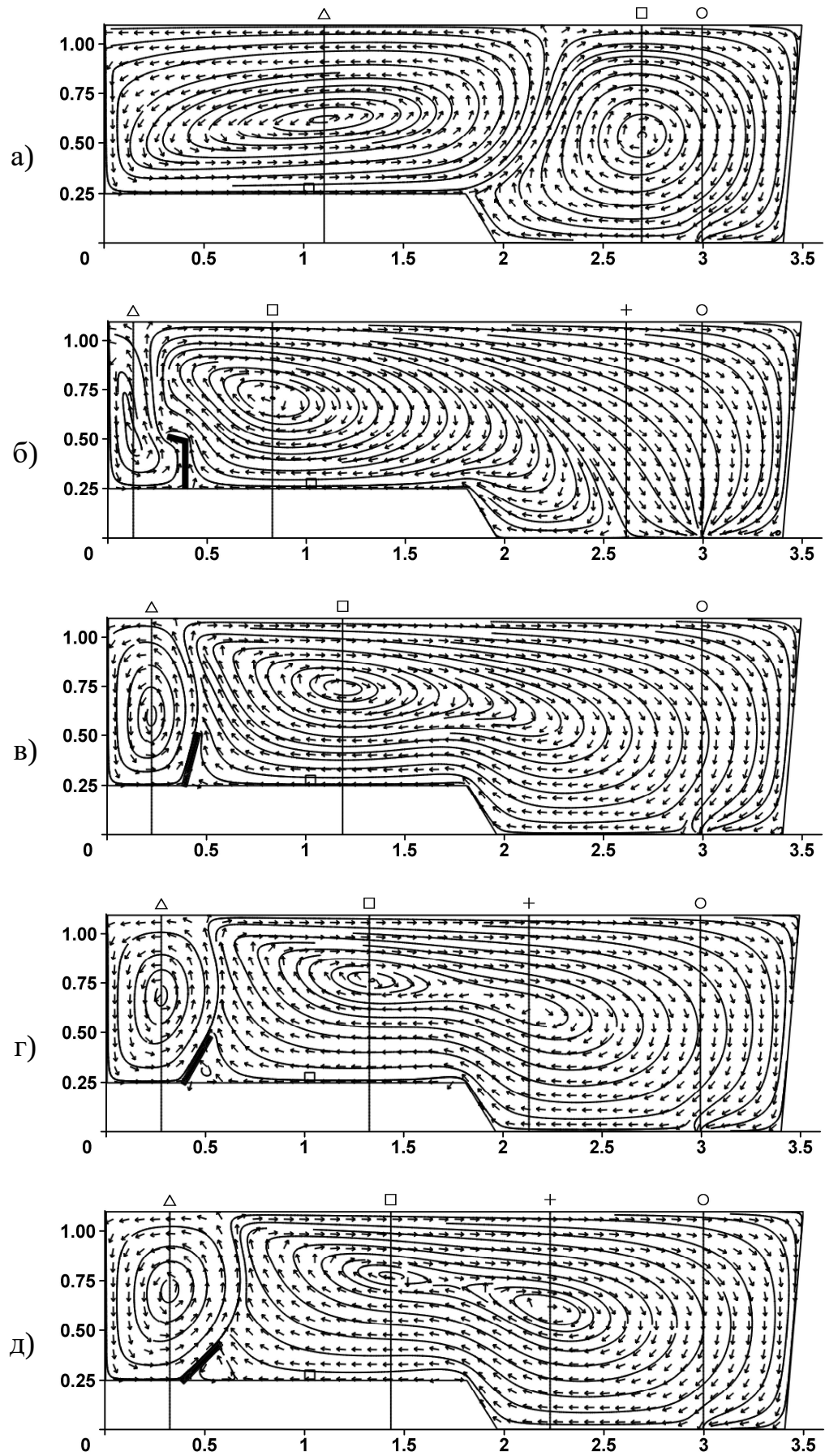


Рисунок 3.3 – Структура течій: а – порожній промковщ; б – зі вставкою типу «турбостоп»; в–д – зі вставкою з нахилом граней на 15° , 30° і 45° .

Епюри горизонтальних складових швидкості, що становлять найбільший інтерес з точки зору циркуляційних процесів в порожнині проміжного ковша в позначених перетинах, наведені на рис. 3.4, а абсолютні значення усереднених швидкостей в тих самих перетинах – на рис. 3.5. Для наочності і зручності аналізу (тут і далі) графіки усереднених абсолютних швидкостей подані у логарифмічній шкалі за швидкостями.

Як підтверджується моделюванням (див. рис. 3.3, а), проста конструкція промковша за відсутності продувки не сприяє видаленню неметалічних включень через невдалу структуру утворюваних вихрових зон з великою ділянкою прямої придонної течії. Лише невелика зона біля бокової стінки може забезпечити доставку включень вгору, створюючи певну перешкоду короткозамкненій течії, але площа взаємодії зі шлаком в даному випадку невелика, ще й за відсутності гарантованої зворотної циркуляції для всього свіжого розплаву, що надходить з сталерозливного ковшу.

З виду профілів швидкості в зоні зворотної циркуляції (Δ) можна зробити висновок, що організація пристрою «турбостоп» істотно впливає на інтенсивність процесів у верхніх шарах розплаву у внутрішній області ПК, причому, з його допомогою можна як їх зменшити, так і інтенсифікувати.

Організація вставки, що обмежує придонну турбулентну зону в області падіння струменя з сталерозливного ковшу, ситуацію покращує, пригнічуючи придонну течію (рис. 3.3, б–д), але й в цьому випадку зона прямого приповерхневого потоку невелика – на значну ділянку припадає застійна спадаюча течія, де винесення неметалічних включень до межі шлаку ускладнене.

На рис. 3.6 показані питомі значення кінетичної енергії потоків, осереднених за об'ємом проміжного ковша для різних варіантів: порожній промковш, вставка типу «турбостоп» і серія варіантів гладких вставок з різних нахилом (0° – 45°). Лінії відповідають енергії руху усередненого потоку, турбулентним пульсаціям і сумарній кінетичній енергії маси розплаву, що залучена до механічного руху.

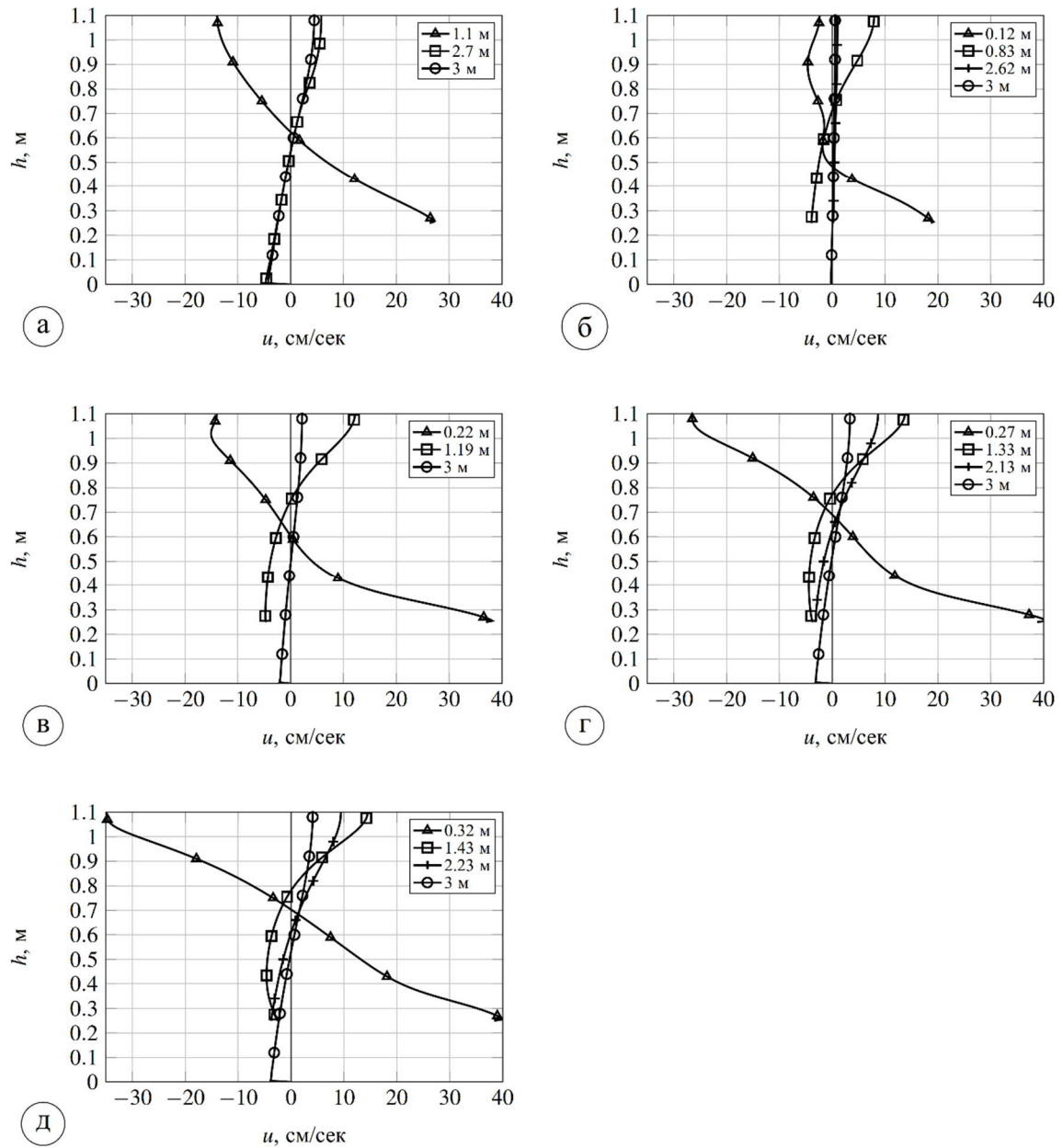


Рисунок 3.4 – Горизонтальна складова швидкості руху потоків розплаву в характерних вертикальних поперечних перетинах проміжного ковша: а) порожній промковш; б) зі вставкою «турбостоп»; в) зі вставкою з нахилом граней відносно вертикального поперечного перерізу в 15° ; г) зі вставкою з нахилом в 30° ; д) зі вставкою з нахилом в 45° .

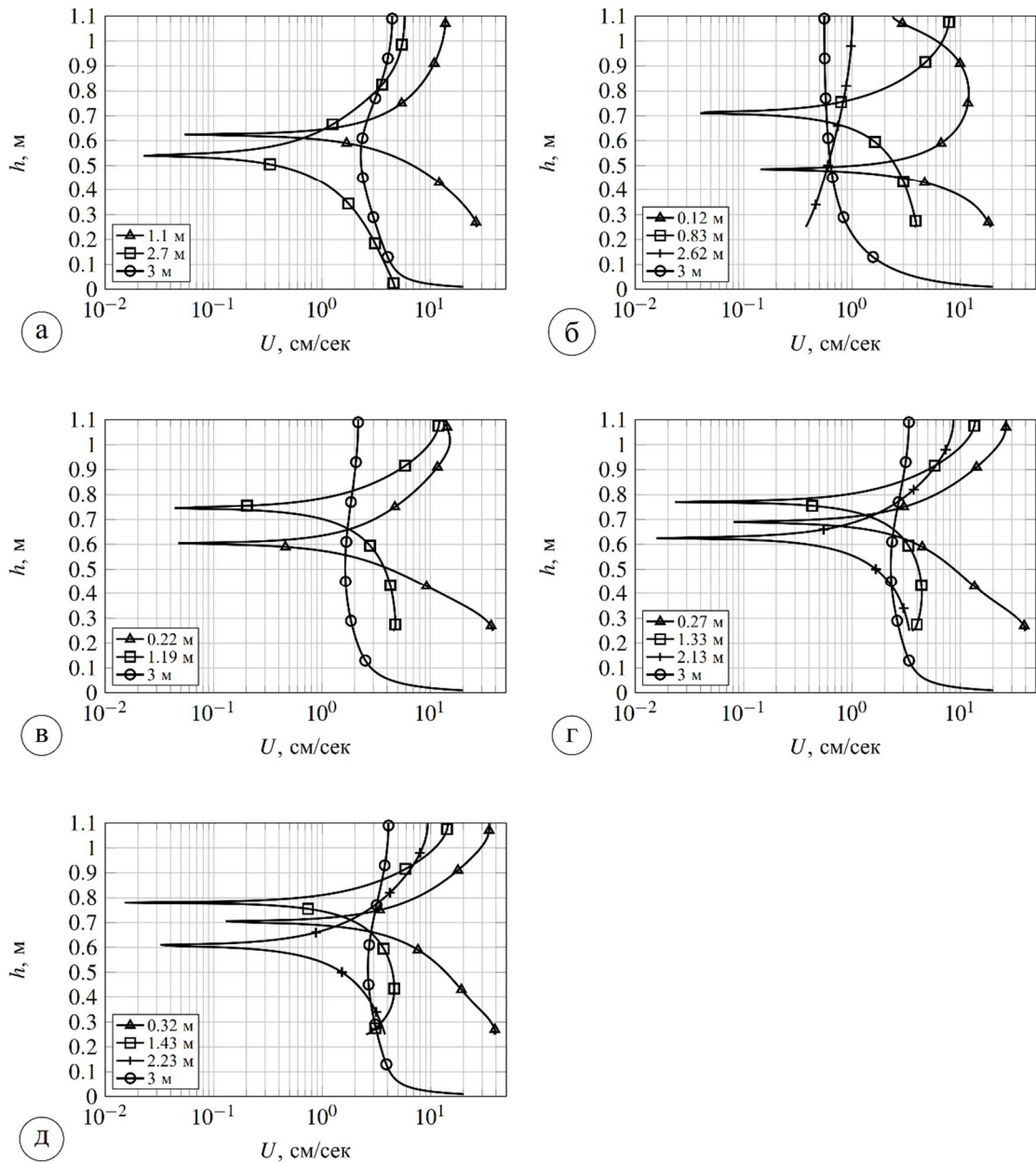


Рисунок 3.5 – Абсолютні значення швидкості руху потоків розплаву в характерних вертикальних поперечних перетинах проміжного ковша: а) порожній промковш; б) зі вставкою «турбостоп»; в) зі вставкою з нахилом граней щодо вертикального поперечного перерізу в 15° ; г) зі вставкою з нахилом в 30° ; д) зі вставкою з нахилом в 45° .

Графіки на рис. 3.6 підтверджують з моделювання, що застосування обмежуючої турбулентності вставки «турбостоп» дає очікуваний ефект, в рамках модельної задачі, проте знижує не лише турбулізацію розплаву в 2 рази (50 % від початкової енергії), бо також призводить до триразового падіння інтенсивності загальних процесів перемішування в порожнині промковша. При цьому енергетично турбулізація розплаву стає порівняна з осередненим рухом маси рідкого металу в промковші.

Відсутність неоднорідності на краях перегородки призводить до меншого пригнічення циркуляційного руху в промковші при збереженні ефективності пригнічення турбулентності (позначка 0° на рис. 3.6) порівняно з «турбостоп» (позначка «т.стоп» на рис. 3.6).

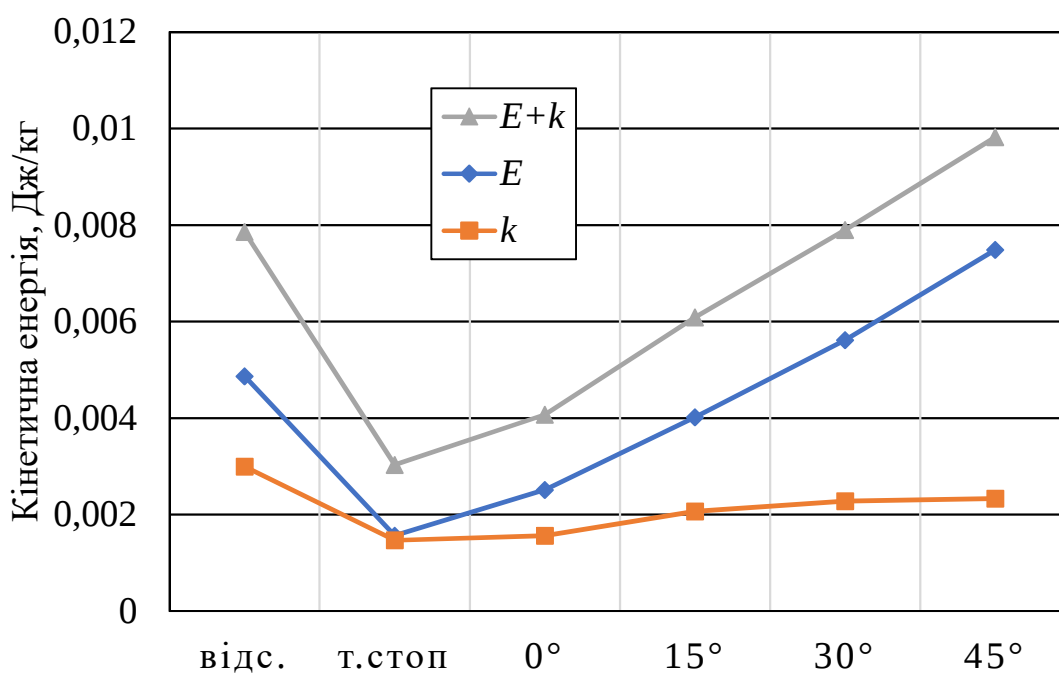


Рисунок 3.6 – Питомі значення кінетичної енергії потоків, осереднених за об'ємом проміжного ковша для різних варіантів: порожній промковш (відс.), промковш зі вставкою «турбостоп» (т.стоп) і серія варіантів вставок з гладким краєм та різним нахилом (0° – 45°). Графіки відповідають енергії усередненого руху потоку (E), турбулентним пульсаціям (k) і сумарній кінетичній енергії залученої в рух маси розплаву ($E+k$).

Варіювання кута нахилу стінки, що обмежує спадаючий струмінь, в діапазоні 0° – 45° відносно до вертикального положення має тенденцію до послаблення ефекту перегородки, при цьому зниження турбулентності зберігається в межах 50–75 % в порівнянні з промковшом без збурюючих потоків внутрішніх конструктивних елементів (позначка «нема» на рис. 3.6).

Істотним ефектом нахилу перегородки є помітне збільшення інтенсивності циркуляційних процесів в проміжному ковші, при цьому спостерігається практично лінійне зростання кінетичної енергії циркуляційних потоків з ростом кута нахилу α (в градусах)

$$E_{\alpha}(\alpha) = 2.428 \cdot 10^{-3} + 1.103 \cdot 10^{-4} \alpha \text{ Дж.} \quad (3.1)$$

Профілі течії на рисунку 3.7 відповідають проміжному ковшу без донних уступів в околиці розливних стаканів з еквівалентним попередньому випадку тоннажем і пропорційній йому висотою рівня розплаву. Як і в попередньому випадку розглянуто: варіант без внутрішніх конструктивних елементів, варіант із вставкою «турбостоп», а також варіанти з варійованим нахилом бічних стінок вставки.

Аналогічно розглянутому попередньо випадку побудовані епюри горизонтальних складових швидкості розплаву в характерних перетинах, а також абсолютні значення усереднених швидкостей в тих самих перетинах, які наведені на рис. 3.8 і рис. 3.9.

Питомі значення кінетичної енергії потоків, осереднених за об'ємом проміжного ковша даної конфігурації для аналогічних варіантів – порожній промковш, вставка типу «турбостоп» і серія варіантів гладких вставок з різним нахилом (0° – 45°), показані на рис. 3.10. Лінії відповідають кінетичній енергії усередненого руху потоку (E), турбулентним пульсаціям (k) і сумарній кінетичній енергії залученої в рух маси розплаву ($E+k$).

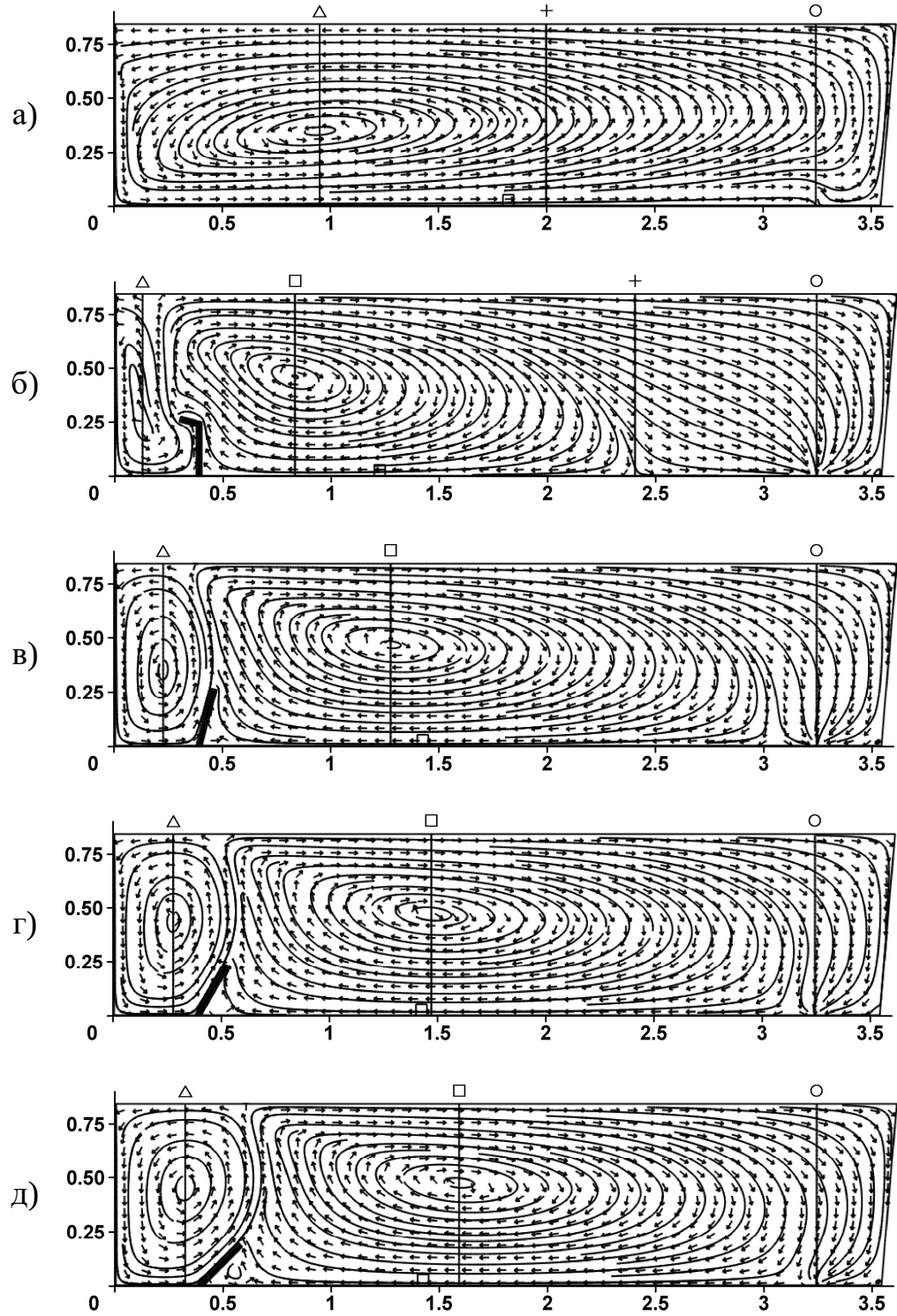


Рисунок 3.7 – Структура течій: а – порожній промковщ; б – зі вставкою типу «турбостоп»; в–д – зі вставкою з нахилом граней на 15° , 30° і 45° .

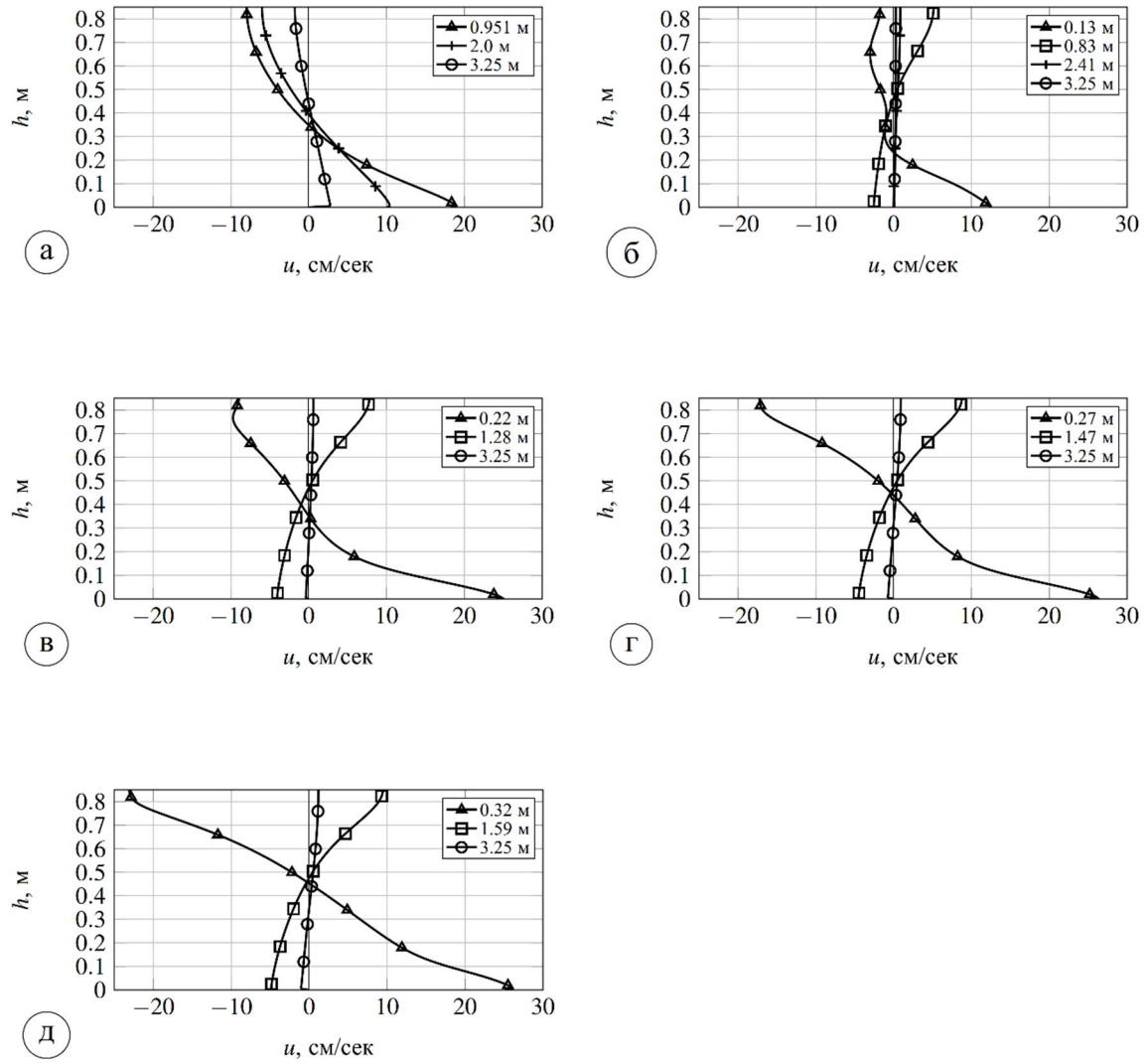


Рисунок 3.8 – Горизонтальна складова швидкості руху потоків розплаву в характерних вертикальних поперечних перетинах проміжного ковша: а – порожній промковш; б – зі вставкою «турбостоп»; в – зі вставкою з нахилом граней відносно вертикального поперечного перетину в 15° ; г – зі вставкою з нахилом в 30° ; д – зі вставкою з нахилом в 45° .

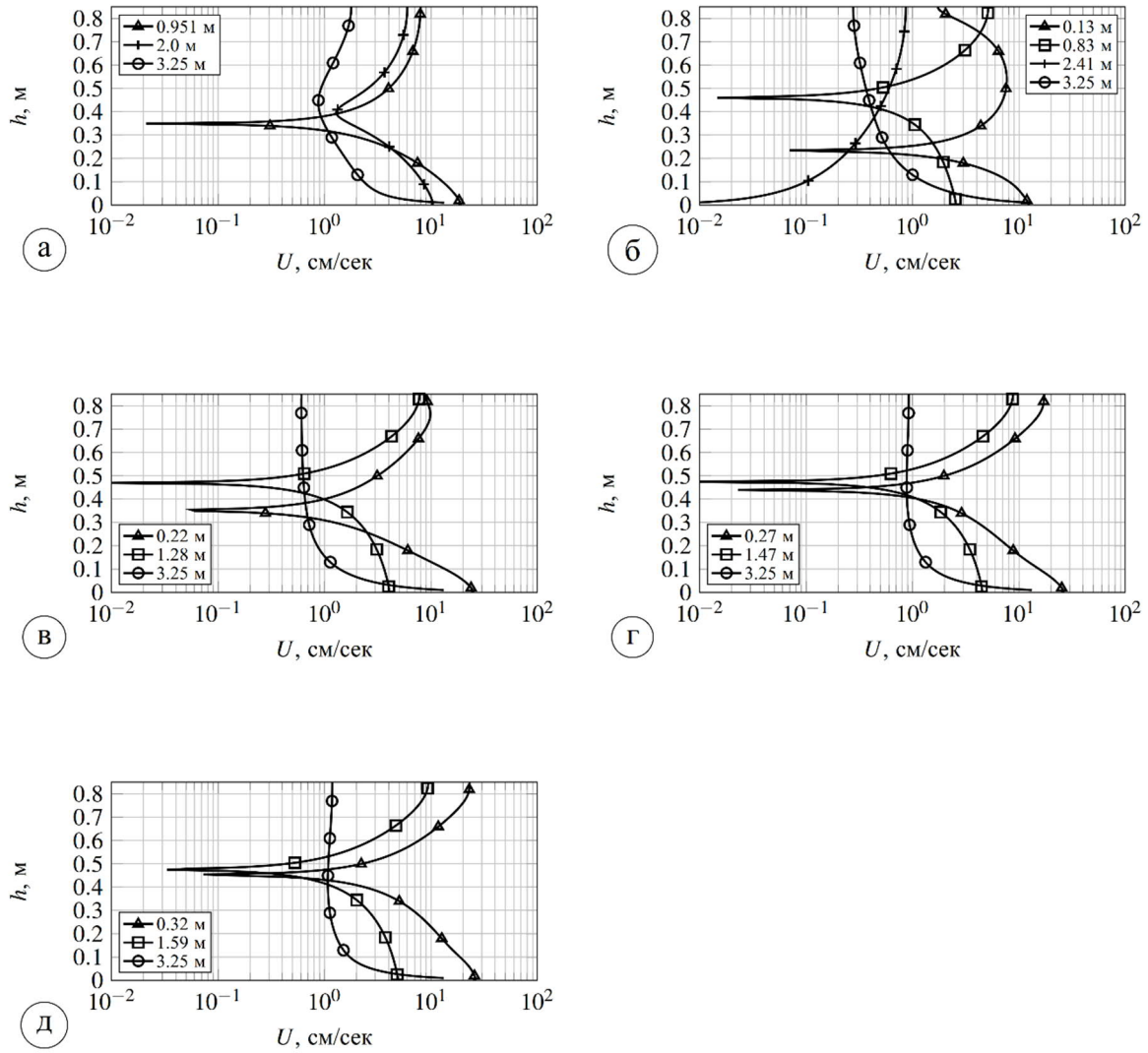


Рисунок 3.9 – Абсолютні значення швидкості руху потоків розплаву в характерних вертикальних поперечних перетинах проміжного ковша: а – порожній промковщ; б – зі вставкою «турбостоп»; в – зі вставкою з нахилом граней відносно вертикального поперечного перетину в 15° ; г – зі вставкою з нахилом в 30° ; д – зі вставкою з нахилом в 45° .

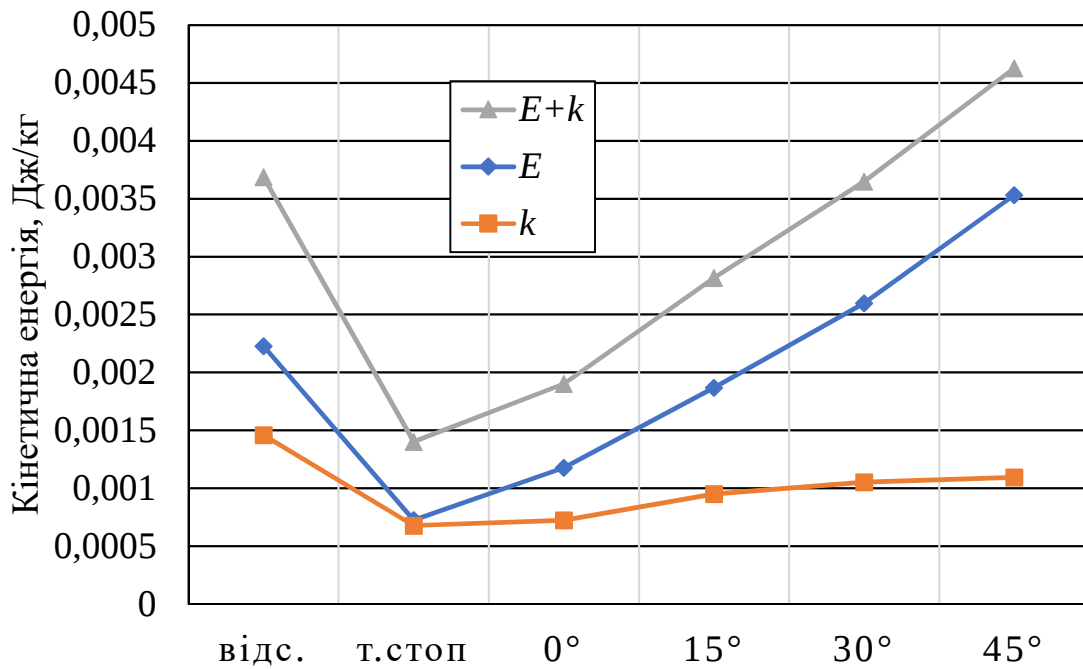


Рисунок 3.10 – Питомі значення кінетичної енергії потоків, осереднених за об'ємом проміжного ковша для різних варіантів: порожній промковш (відс.), промковш зі вставкою «турбостоп» (т.стоп) і серія варіантів вставок з гладкою кромкою і різним нахилом (0° – 45°).

Застосування обмежуючої турбулентності вставки «турбостоп» забезпечує зниження турбулізації розплаву на 54 % і також призводить до триразового падіння загальної інтенсивності процесів перемішування в порожнині промковша, зрівнюючи енергетично турбулізацію розплаву з осередненим рухом в промковші.

Все, що стосується виявлених закономірностей в першій серії моделювання, залишається справедливим для другої серії зі зміненою геометрією промковша.

Варіювання кута нахилу стінок вбудованого елемента призводить до тієї ж тенденції ослаблення ефективності «турбостоп». Турбулізація зберігається в межах 50–75 % від турбулізації розплаву в промковші без вбудованих елементів.

Спостерігається також близький до лінійного приріст енергії залученого в рух об'єму розплаву по мірі відхилення стінок вбудованого елемента, що відбиває потік

$$E_q(\alpha) = 2.716 \cdot 10^{-7} \alpha^2 + 3.976 \cdot 10^{-5} \alpha + 1.185 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}, \quad (3.2)$$

де α – кут відхилення стінки від вертикального положення, °.

3.3 Оцінка можливостей організації ефективної доставки неметалічних включень до межі розділу «метал – шлак»

У [18] було показано, що залишкові неметалічні включення, які потрапляють у промковш з металом із сталюковша мають невеликі розміри ($\sim 2\text{--}15$ мк). Розглянемо динаміку таких неметалічних включень за наступних припущень:

1. не розглядаються гідродинамічні ефекти для неметалічних включень (в досліджуваному випадку об'єм НВ набагато менший за об'єм бульбашок газової фази у разі продувки);
2. групова складова швидкості дифузії НВ відносно руху розплаву не враховується (з тієї ж причини невеликих вирішальних габаритів НВ);
3. теплові зміни включень не розглядаються, тому що температура плавлення НВ вища від температури розплаву.

Оцінку поведінки НВ в циркуляційних потоках можна зробити скористувавшись критерієм Річардсона (Ri), який дорівнює відношенню потенційної енергії тіла, зануреного в рідину, до його кінетичної енергії:

$$Ri = \frac{(\rho_m - \rho_q) \vec{g} r_q}{\rho_m v^2} \quad \text{або} \quad Ri = \frac{Ar}{Re^2}, \quad (3.3)$$

де ρ_m – щільність рідини; ρ_q – щільність НВ; g – прискорення сили тяжіння; r_q – радіус НВ; v – кінематичний коефіцієнт в'язкості.

Якщо число Річардсона менше одиниці, то число Архімеда (Ar) і відповідна рушійна сила не мають впливу на частинку. Якщо воно більше за одиницю, сила плавучості є домінуючою.

Визначимо умови для неметалічних включень із щільністю $\rho_{\text{ч}} = 3,032 \text{ кг/м}^3$ та радіусом від 5 до 20 мк.

Число Архімеда (Ar), що характеризує рух тіл у навколишньому середовищі (рідині чи газі), який відбувається в результаті неоднорідності щільності в системі «тіло–середовище»:

$$Ar = \frac{\bar{g} r_{\text{ч}}^3 (\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{ч}})}{\rho_{\text{м}} \nu^2} \quad (3.4)$$

Для визначення критерію Рейнольдса (Re), що характеризує відношення динамічних сил до в'язких,

$$Re = \frac{\nu r_{\text{ч}}}{\nu} \quad (3.5)$$

необхідно знати швидкість НВ.

Згідно із законом Стокса швидкість дифузії НВ у нерухомому середовищі:

$$\bar{v}_{\text{ч}} = \frac{2 r_{\text{ч}}^2 \bar{g} (\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{ч}})}{9 \mu}, \quad (3.6)$$

де μ – динамічна в'язкість розплаву. Тоді колективна швидкість НВ відносно швидкості розплаву визначається формулою:

$$\bar{v} = (1 - k\beta) \bar{v}_{\text{ч}} + k\beta \bar{v}_{\text{м}}, \quad (3.7)$$

де ν і $\nu_{\text{м}}$ – відносна швидкість НВ та швидкість розплаву відповідно, $k \in [0, 1]$ – емпіричний коефіцієнт захоплення, який визначає долю частинок, що захоплюється газовою фазою, очевидно, чим вона більша, тим меншою є частинка, β – газова фаза, розподіл якої описано розділі 2.

Згідно з розрахунками для 43-тонного промковша ПАТ МК «Азовсталь» [19] максимальна швидкість руху потоку в промковші, становить 0,44 м/с.

На відміну від сил плавучості, гідродинамічний опір, який діє на НВ, залежить від форми частинки, швидкості потоку та числа подібності:

$$\chi = c_v \frac{\rho_m v^2}{2} S, \quad (3.8)$$

де c_v – безрозмірний коефіцієнт опору, який залежить від критерія подібності Рейнольдса, S – характерна площа перетину, типова для частинок НВ.

Результати розрахунків параметрів руху залишкових НВ розмірами 5–20 мк наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Результати розрахунків зазначених величин для НВ різної величини.

Радіус НВ, мк	Ar	χ , Н/м ²	$\vec{v}_q$, м/с	$\vec{v}$, м/с	Re	Ri
5	0.0007075	0.017584	$3.14 \cdot 10^{-6}$	0.3998	2.00	0.00018
10	0.00566	0.035168	$1.26 \cdot 10^{-5}$	0.3996	4.00	0.00035
15	0.0191025	0.052752	$2.83 \cdot 10^{-5}$	0.3994	5.99	0.00053
20	0.04528	0.070336	$5.03 \cdot 10^{-5}$	0.3992	7.98	0.00071

Очевидно, чим менший коефіцієнт гідродинамічного опору χ , тим більше включення інтегроване в гідродинамічний потік. Зі зростанням радіуса неметалічного включення критерій плавучості Ar зростає в параболічній залежності, а гідродинамічний опір майже лінійний.

Для розмірів частинок, що розглянуто, сили плавучості Ar майже не впливають на переміщення неметалічних включень до зони шлаку и вплив конвекції (кінетична енергія, яку характеризує критерій Re^2) також не є суттєвим.

У першому розділі було з'ясовано, що домінуючим механізмом осадження таких включень є дифузія з турбулентного потоку, причому для включень ще біль дрібних фракцій (< 1 мк) немає ефективного кінематичного способу виведення з розплаву. Тож для інтенсифікації процесу видалення надлишкових НВ слід, по можливості, мати певну турбулізацію розплаву,

особливо приповерхневих його шарів, що контактують із шлаком. Напевно, суттєвим джерелом турбулізації розплаву може бути продувка інертним газом.

3.4 Аналіз негативного впливу перехідних режимів на гідродинаміку конвективних потоків в промковші

Моделювання перехідних режимів безперервної розливки проводилося у відповідності з викладеної в п. 2.2 схемою процесу при тих же параметрах розливання (кристалізатори перетином 1850×250 мм зі швидкістю витягування слябів 0.8 м/хв). Мінімальний рівень металу в приймальній секції прийнятий 0.4 м [12].

Конструкція проміжного ковша, з розташуванням розливних і приймальної секцій, а також розмежувальних перегородок з фільтраційними каналами описана також в розділі 2.

В даному дослідженні у якості фактора впливу перековшовки на якість металу розглянуто формування циркуляційних потоків приймальної секції, що задає гідродинамічну структуру, напрямки і швидкості руху потоків по всьому об'єму проміжного ковша.

У процесі первісного наповнення секціонованого проміжного ковша (початок розливання першої плавки в серії) через те, що рідина з приймальної секції проходить тільки через нижній ряд каналів, тобто задіяна одна третина загального прохідного перерізу перегородки, і з урахуванням конструкції прямка, рівень наповнення роздавальних секцій протягом невеликого інтервалу часу відстає від приймальної секції. Подальше наповнення ковша металом до досягнення робочого рівня відбувається одночасно з розливанням.

Умовно поділимо процес перековшовки сталерозливних ковшів на два етапи. Перший – припинення надходження металу з стальковша і опускання рівня дзеркала металу в промковші; другий – зміна положення захисної труби у зв'язку зі зміною сталерозливного ковша і підвищення рівня дзеркала металу в промковші.

Математичне моделювання показує, як в процесі перековшовки, коли припиняється подача металу з сталерозливного ковша, гідродинамічна структура переходить в нестационарний режим, що починається з початком зниження рівня металу в приймальній секції. При цьому стабілізовані циркуляційні потоки згасають трансформуючись в пряму придонну течію металу з приймальної секції через фільтраційні канали в розливні (рис. 3.11а, б, в), що пояснюється відсутністю збурення з боку струменя металу, що надходить, при плавному зниженні рівня розплаву, що обмежує масштаби великих вихорів, а через них – вплив природноконвективного руху, і підтверджується графіками розподілу компонентів швидкості уздовж ванни промковша для зазначеного моменту часу (рис. 3.12б, в) – рух розплаву відбувається рівномірно по всьому об'єму в напрямку каналів, розташованих в бічних стінках.

Описаний вище процес вже майже через хвилину призводить до нового сталого розподілу вихрової структури. Однак, весь період перековшовки, коли захисна труба переміщується в протилежне (з крайнього лівого в крайнє праве) положення приймальної секції промковша, рівень розплаву, що знизився під час зміни ковша, буде підвищуватися, тому гідродинамічна ситуація в ванні проміжного ковша в цей період не є стаціонарною.

Горизонтальна складова швидкості руху потоків металу на рівні фільтраційних каналів перевищує вертикальну, які при рівні розплаву 0,65 м становлять 0,08 м/с і 0,02 м/с відповідно. У горизонтальному напрямку метал рухається від центру приймальної секції до перегородок з фільтраційними каналами (рис 3.11а, б, в і рис. 3.12а, б, в).

Прямоточний рух розплаву в горизонтальному напрямку не тільки знижує рафінувальну дію проміжного ковша з фільтраційними каналами, але може сприяти затягуванню покривного шлаку в об'єм металу, оскільки має місце незначне запізнення в динаміці руху рівня розплаву спочатку приймальної (при зниженні рівня), а після подачі розплаву з нового ковша – розливної секції (при підвищенні рівня).

З рис. 3.11г видно, що при зміні стальковша і переміщенні, в зв'язку з цим, захисної труби в протилежну частину ванни промковша, в околі струменя утворюються вихори, індуковані механічним впливом останньої. Це породжує додаткову вихрову структуру, що поширюється до протилежної стінки.

За архітектурою вихорів по епюрам компонентів швидкості видно, що залишкового впливу струменя, який мав інше положення до перековшовки, практично не виявляється через встановлення симетричного руху під час зниження рівня дзеркала металу. Визначальним фактором тут є інтенсивність затопленого струменя із захисної труби.

Після припинення наповнення промковша (кінець другого етапу) має місце перехідний процес, аналогічний тому, що відбувається на першому етапі при зниженні рівня розплаву. Амплітуди швидкостей потоків зберігаються, рух же розплаву визначається імпульсом, що передається загальному об'єму розплаву струменем із захисної труби в протилежному положенні. Як наслідок, напрямок обертання вихорів вимушеної конвекції буде протилежний показаному на рис. 3.11.

При перековшовці і подачі струменя металу в протилежну частину приймальної секції в розплаві спостерігається формування циркуляційних потоків, які охоплюють усе більші об'єми розплаву (рис. 3.11г), при цьому значно змінюються як напрямки так і швидкості їхнього руху (рис. 3.11г, 3.12г). Не стабілізовані циркуляційні потоки негативно позначаються на чистоті металу по неметалічним включенням.

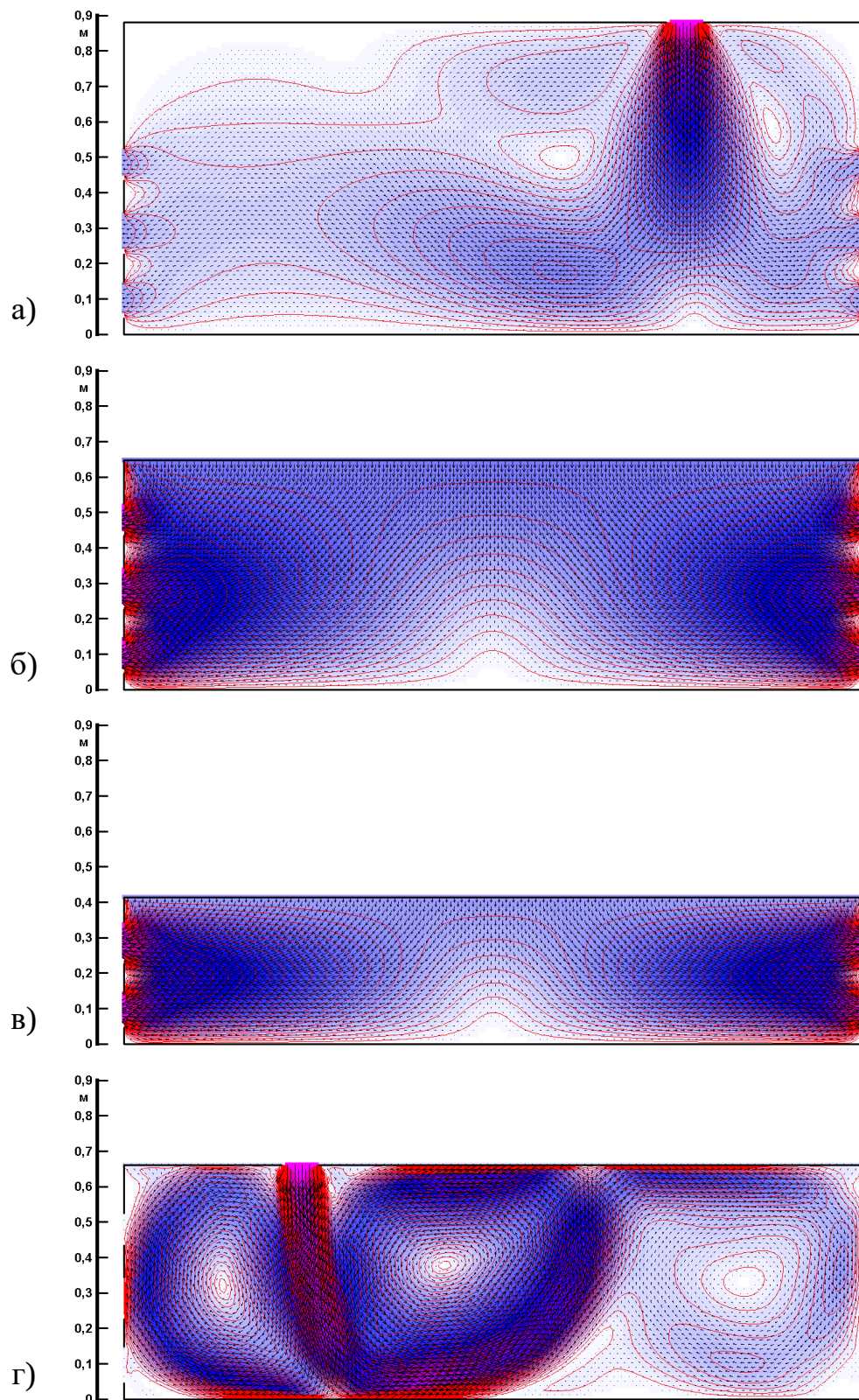


Рисунок 3.11 – Структура циркуляційних потоків металу в приймальній секції трисекційного проміжного ковша: а – рівень металу постійний і дорівнює 0,89 м; б – рівень металу знижується і дорівнює 0,65 м; в) рівень металу дорівнює 0,40 м; г – рівень металу підвищується і дорівнює 0,65 м.

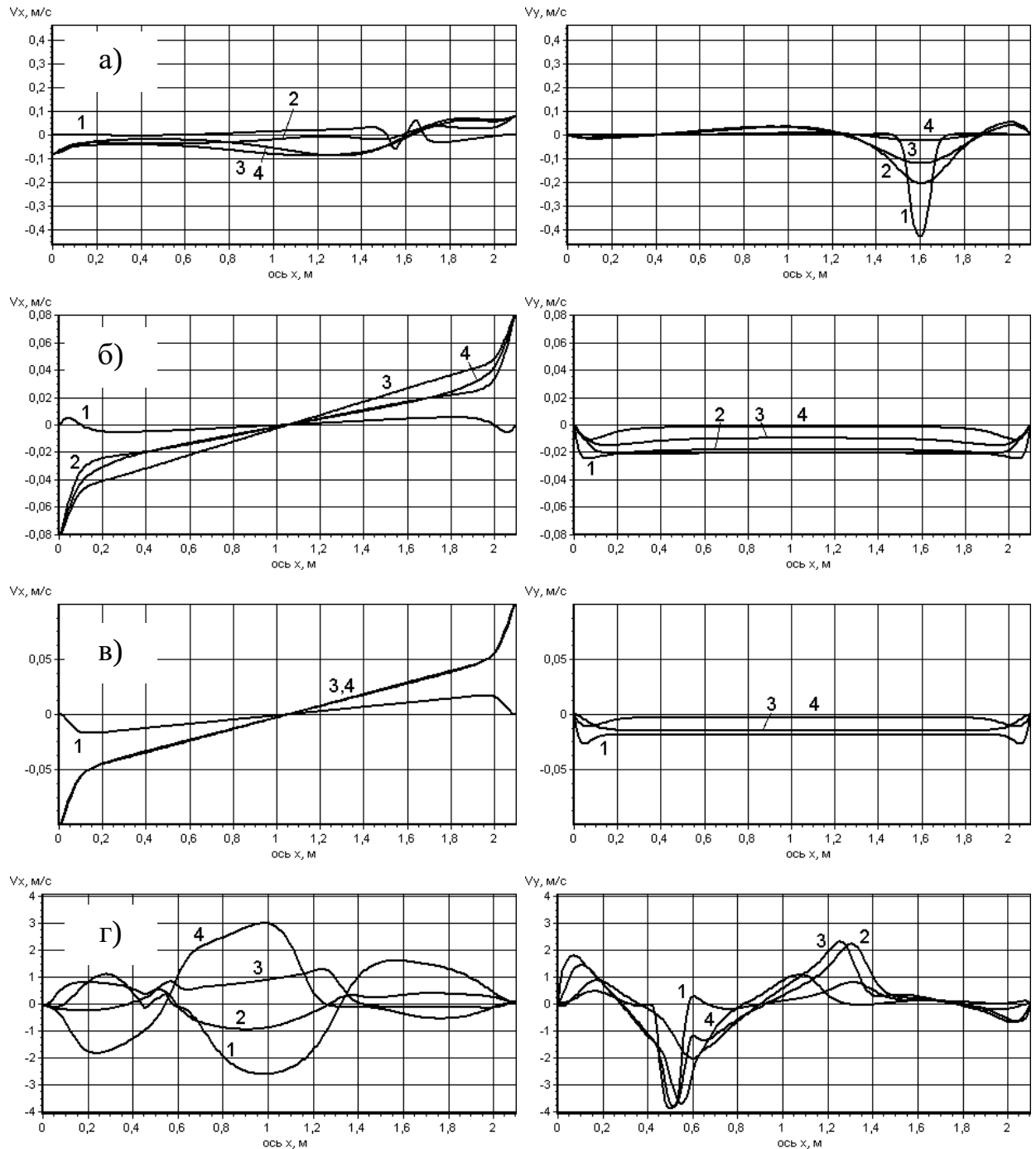


Рисунок 3.12 – Горизонтальна і вертикальна складові компоненти швидкості руху потоків металу в приймальній секції трисекційного проміжного ковша: а – рівень металу постійний і дорівнює 0,89 м; б – рівень металу знижується і дорівнює 0,65 м; в – рівень металу дорівнює 0,40 м; г – рівень металу підвищується і дорівнює 0,65 м. Позначення: 1 – швидкість руху поблизу «дзеркала» металу; 2, 3, 4 – на рівні верхнього, середнього і нижнього каналів відповідно.

При подальшій перековшовці спостерігається виражена циклічність перехідних процесів, що відбуваються зі зміною напрямків руху на протилежні як при зниженні рівня розплаву, так і при наповненні промковша.

Отже, у процесі перехідних режимів під час безперервного розливання, коли в проміжному ковші не сформовані стабільні циркуляційні потоки і спостерігається прямий плин металу з приймальної секції в розливні секції і далі в кристалізатори, в готовому металі може спостерігатися підвищена кількість неметалічних включень, що призводять до погіршення якості сталі.

Вплив перехідних режимів безперервного розливання на якість металу визначався за допомогою виконаного аналізу відсортювання листового прокату за дефектами сталеплавильного виробництва на широкому сортаменті сталей марок Х70, 10Г2ФБЮ, 13Г1С-У, 17Г1С-У, 09Г2С та ін. (таблиця 3.2).

Були відібрані сляби кратної довжини (надалі «крати»), виготовлені в період перехідних режимів розливки сталі, до яких віднесено:

- крати перших слябів перших плавов в серії по обох струмках;
- один крат до і два крати після заміни проміжного ковша;
- крати останніх слябів останніх плавов в серії.

Всього було проконтрольовано 5470.5 і 108516.7 тонн металу, розлитого в період перехідних і стаціонарного режимів безперервного розливання відповідно.

В результаті встановлено, що рівень відсортювання листів за дефектами сталеплавильного виробництва, прокатаних зі слябів, що відлиті в період нестаціонарних перехідних режимів безперервного розливання вище, ніж зі слябів, що відлиті в стаціонарних режимах розливання. Відсортювання за дефектом «плену» вище в 1.2 рази, а за результатами ультразвукового контролю – в 2.4 рази.

Значний відсоток відсортювання листів за дефектами, що були прокатані зі слябів, які були відлиті в перехідний період, пояснюється забрудненням металу неметалічними включеннями, що підтверджують також результати математичного моделювання.

Таблиця 3.2

Відсорткування листового прокату за дефектами
сталеплавильного виробництва

Перехідні режими	Прокатано кратів, шт	Отримано листів, тон	Відсортковано, тон / %	
			Плену	УЗК
Перша плавка в серії	205	2014.64	<u>12.01</u> 0.60	<u>6.17</u> 0.31
Заміна проміжного ковша	128	1197.84	<u>3.56</u> 0.71	<u>18.01</u> 1.50
Остання плавка в серії	259	2258.05	<u>7.53</u> 0.33	<u>69.37</u> 3.07
Загалом під час перехідних режимів	592	5470.53	<u>28.1</u> 0.51	<u>93.55</u> 1.71
В усталеному режимі розливання		108516.65	<u>481.02</u> 0.44	<u>763.39</u> 0.70

Встановлено, що в пробах металу, які відібрано від слябів №1 по обом струмкам та слябу №3 струмка №8 першої плавки в серії з боку малого радіусу, спостерігається поодинокі неметалічні включення по глибині від 6 до 60 мм.

Аналогічні поодинокі неметалічні включення в пробах металу, які було відібрано під час розливання плавки № 2 і 4 в серії, що розливалась, відсутні.

Мікродослідження полягали у визначенні та підрахунку НВ і проводилися на шліфах, що вирізані із зон точкової неоднорідності від темплетів №3 першої та четвертої плавки в серії.

Забрудненість металу НВ підраховувалася по 20-ти полях зору при збільшенні 400 од. в об'ємних відсотках за методикою ЦНДІчормет.

Основним видом неметалічних включень в металі досліджуваних проб є сульфіти, сульфосилікати, силікати і оксисульфіти.

Сірчані відбитки виявили слабо виражену ліквіацію сірки з незначним її посиленням у вигляді дрібних точок в осьовій зоні і в середній третині по товщині слябу.

Глибоке травлення темплетів виявило осьову рихлість у вигляді ділянок підвищеного травлення, окремих дрібних пор і звивистих розтравів.

Результати підрахунку забрудненості металу НВ представлені в таблиці 3.3.

На підставі проведених макродосліджень встановлено, що на першій плавці розливої серії, особливо на перших слябах з боку малого радіусу, практично, по обох струмках, спостерігається присутність поодиноких неметалічних включень силікатного топу на глибині від 6 до 60 мм. Ці НВ при розливанні подальших плавок практично відсутні.

Виконані макродослідження свідчать, що в зоні точкової неоднорідності зазвичай присутні НВ типу сульфідів, сульфосилікатів, силікатів і оксисульфідів. Загальна кількість неметалічних включень для першої плавки розливої серії вище, ніж для наступних (плавка №4 в розливої серії, див. таблицю). У наступних плавках спостерігається значне зниження кількості силікатних включень.

Таблиця 3.3

Підрахунок забрудненості металу НВ

№ плавки / № плавки в серії	Нумерація проби	Місце вирізки шлюру на слябі	Об'ємний перерахунок НВ 10 ⁻³ %				
			Силікати	Сульфіді	Сульфо-силікати	Оксі-сульфіді	Σ
2604128/1	7-3-2	Зона точкової неоднорідності	81.7	49.4	3.5	—	134.6
2604131/4	7-3-2		16.9	79.8	7.4	8.0	112.1

Процес зміни сталерозливного ковша з урахуванням можливих коливань забрудненості і хімічного складу металу в послідовних сталерозливних ковшах може призводити до неоднорідності властивостей розплаву, що розливається по різних струмкам ПК, з причини того, що розплав при різному відносному положенні струменя має різний час руху до потрапляння в канали правої і лівої розливних секцій. Кращі умови по видаленню НВ завжди зберігаються у більш віддаленій від струменя розплаву, що надходить, розливній секції ПК, так як там немає короткозамкнених течій.

При цьому зміна напрямку перемішування в цілому позитивно позначається на гомогенізації розплаву, що перебуває в приймальній секції.

Висновки до третього розділу

Моделювання підтверджує ефективність застосування обмежуючої турбулентності вставки «турбостоп», показуючи зниження турбулізації розплаву на 54 %. Також моделювання свідчить, що використання такої вставки призводить до триразового падіння загальної інтенсивності циркуляційних процесів перемішування в порожнині промковша, урівнюючи енергетично турбулізацію розплаву з осередненим рухом в промковші. Останнє призводить до відповідної кратності зниження можливих індексів рециркуляції розплаву і тому в даному сенсі має негативний ефект на процес рафінування. Хоча, у використанні такої вставки «турбостоп» є один беззаперечний плюс в унеможливленні короткозамкнених придонних течій у стакани кристалізаторів, які наочно демонструє моделювання руху розплаву у промковші, вільному від будь-яких елементів, що обмежують струмінь із сталковша.

Альтернативні обмежуючі елементи, які не мають геометричної неоднорідності на кромках стінок, що призначені для тих самих цілей обмеження турбулентності, призводять до меншого пригнічення

циркуляційного руху в промковші при збереженні ефективності пригнічення турбулентності порівняно з розглянутою промисловою вставкою «турбостоп».

Збільшення кута розкриття бічних стінок таких альтернативних обмежуючих елементів в діапазоні $2 \times (0-45)^\circ$ відносно до вертикального положення має тенденцію до послаблення ефекту перегородки, при цьому зниження турбулентності зберігається в межах 50–75 % в порівнянні з промковшом без збурюючих потік внутрішніх конструктивних елементів. Але істотним ефектом нахилу перегородки є вагоме збільшення загальної інтенсивності циркуляційних процесів в проміжному ковші, при цьому спостерігається практично лінійне зростання кінетичної енергії циркуляційних потоків з ростом кута нахилу. На відміну від стандартної вставки «турбостоп» така ситуація має покращувати індекси рециркуляції розплаву і тому, навпаки, позитивно впливати на процес рафінування.

Отже, в результаті математичного моделювання встановлена гідродинамічна структура циркуляційних потоків, напрямків і швидкості їх руху в перехідних режимах безперервного розливання.

Визначено, що під час перехідних режимів, коли в проміжному ковші не сформовані усталені циркуляційні потоки, спостерігається прямий плин металу з приймальної секції в розливні і далі в кристалізатори, що знижує рафінувальну дію проміжного ковша і підвищує забрудненість кінцевого металу неметалічними включеннями.

В результаті промислових досліджень впливу перехідних режимів на якість металу встановлено, що відсорткування листів за дефектами сталеплавильного виробництва в даний період вище, ніж від слябів, що отримано в стаціонарному режимі розливання, зокрема відсорткування по дефекту «плону» вище в 1,2 рази, а за результатами ультразвукового контролю – в 2,4 рази.

РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПРОЦЕСУ ПРОДУВКИ ВАННИ ПРОМКОВША НА КІНЕТИКУ ВИДАЛЕННЯ НЕМЕТАЛІЧНИХ ВКЛЮЧЕНЬ

В даному розділі розглядаються гідродинамічні аспекти формування струменевих течій в порожнині проміжного ковша в залежності від його внутрішньої конфігурації і вбудованих елементів під дією продувки. Увага приділена структурі течій при наявності продувки аргоном та впливу на вимушену конвекцію в порожнині промковша виключно продувки та продувки за наявності вбудованих елементів, що розглянуті в попередньому розділі.

У п. 4.1 наведені результати дослідження щодо вибору параметрів і припустимого діапазону режимів дії на розплав, за яких не повинно спостерігатися очевидного погіршення умов роботи проміжного пристрою через надмірну турбулізацію або виникнення негативних явищ на межі розділу «метал – шлак».

У п. 4.2 представлені результати та аналіз газогідродинамічних процесів у промковші в умовах продувки, де варіювались окремі її параметри.

У п. 4.3 представлено запропонований спосіб аналізу інформації про структуру течії та питомі значення кінетичної енергії та турбулентної енергії, отриманої за результатами чисельного моделювання, що дозволяє безпосередньо визначати характерні зони. Також у розділі показані результати аналізу виконаних у 3 та 4 розділах чисельних експериментів.

У п. 4.4 представлено результати дослідження якості сталі, з дослідного та порівняльного промковшів в умовах промислового експерименту, в якому були використані складові частини технології рафінування, що пропонується.

Основні результати розділу опубліковані в [12, 19, 20, 22, 24].

4.1 Фізичне моделювання поширення газових струменів в рідкому металі в залежності від конструктивних параметрів фурм і динамічних факторів витікання

Вивчення динамічних характеристик витікання газових струменів проводили методами «холодного» фізичного моделювання. Система «рідкий метал–аргон» імітувалась за допомогою води і повітря. Геометричний масштаб моделі δ_L дорівнював 1:3, всі геометричні розміри на моделі були зменшені в 3 рази. В процесі моделювання вимірювали витрату газу через одиночний канал Q_r і тиск в ресивері, а також за допомогою фотореєстрації фіксували особливості формування газового струменя в рідині і на її поверхні.

На рис. 4.1 показана залежність витрати газової фази через одиночний канал фурми Q_r при зміні величини тиску газу P в ресивері. Слід зазначити, що значення P є інтегральною характеристикою, так як воно містить тиск стовпа рідини в моделі, місцеві втрати тиску в місцях з'єднань і втрати тиску вздовж газової магістралі.

Виміри проводилися в інтервалі зміни величини P від 5 до 10 кПа з кроком 1 кПа. Відповідний інтервал зміни величини витрат Q_r через одиночний отвір становив $(8-18) \times 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$. Нижні межі зміни величин P і Q_r , рівні 5 кПа і $8 \times 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$, є нижніми межами стабільного витікання газової фази з одиночного каналу, при якому в підвідний канал не потрапляє рідка фаза.

Для визначення ефективних технологічних параметрів продувного пристрою методами фізичного моделювання вирішувалась внутрішня задача взаємодії газових струмів, що витікають в рідину. У якості конструктивних параметрів розглянуто елементи фурми з вертикальними каналами, розташованими на відстані ΔL один від одного (рис. 4.2а), і просторово орієнтованими каналами [22]. У другому випадку (дворядне розташування отворів по довжині фурми) прилеглі канали кожного ряду можуть розташовуватися (рис. 4.2б): в одній площині 1–1; або із зсувом на величину $\Delta L/2$ в площині 2–2.

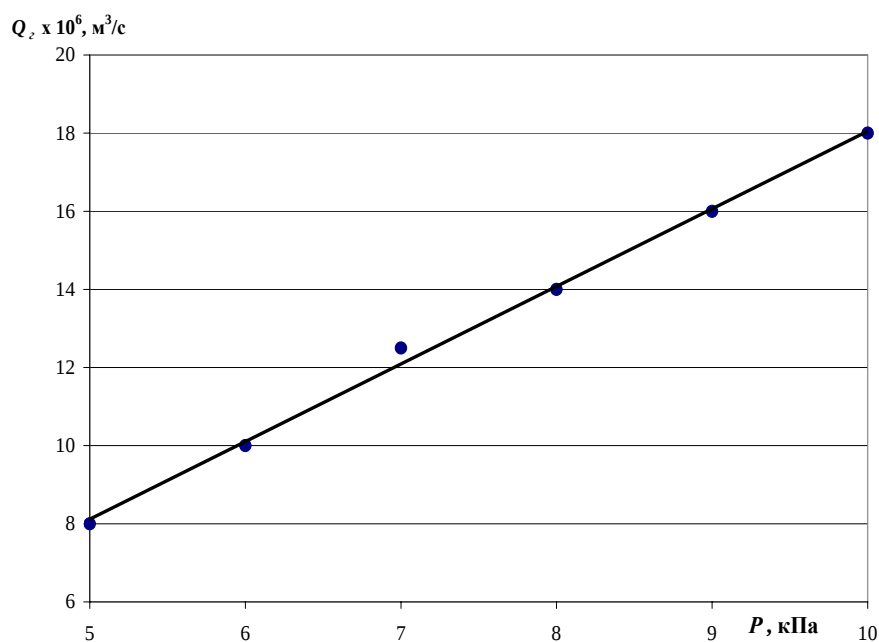


Рисунок 4.1 – Залежність величини витрати повітря Q_g , що витікає з одиночного отвору в воду, від величини тиску P в ресівері (моделювання).

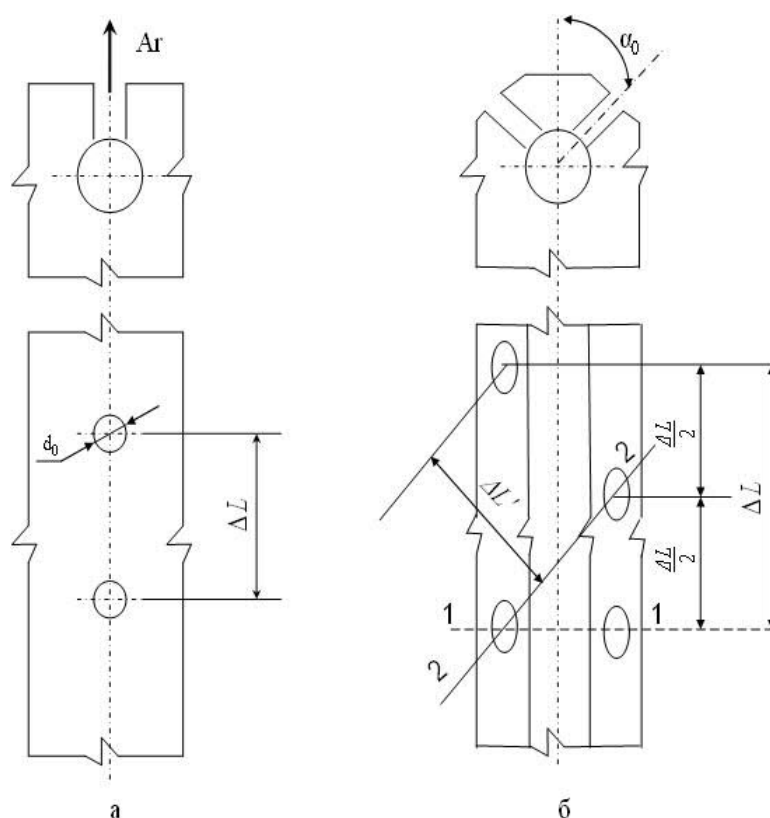


Рисунок 4.2 – Конструктивні особливості елемента форми з вертикальними (а) і просторово орієнтованими (б) каналами: перетин 1–1 – канали розташовані в одній площині; перетин 2–2 – вертикальні перерізи каналів поперемінно зміщені.

На рис. 4.3 показані особливості формування газо-рідинного потоку при вертикальному підводі газової фази під затоплений рівень в залежності від витрати газу Q_g або тиску P в ресивері. В місці входу в рідину газова фаза утворює бульбашки, які, відриваючись від вхідного отвору каналу фурми, формують компактну зону бульбашок повітря у вигляді факела. Висота цієї зони коливається від значення $(0,20-0,25) H$ для 1–2 рівнів тиску до $(0,20-0,45) H$ для 5–6 рівнів тиску.

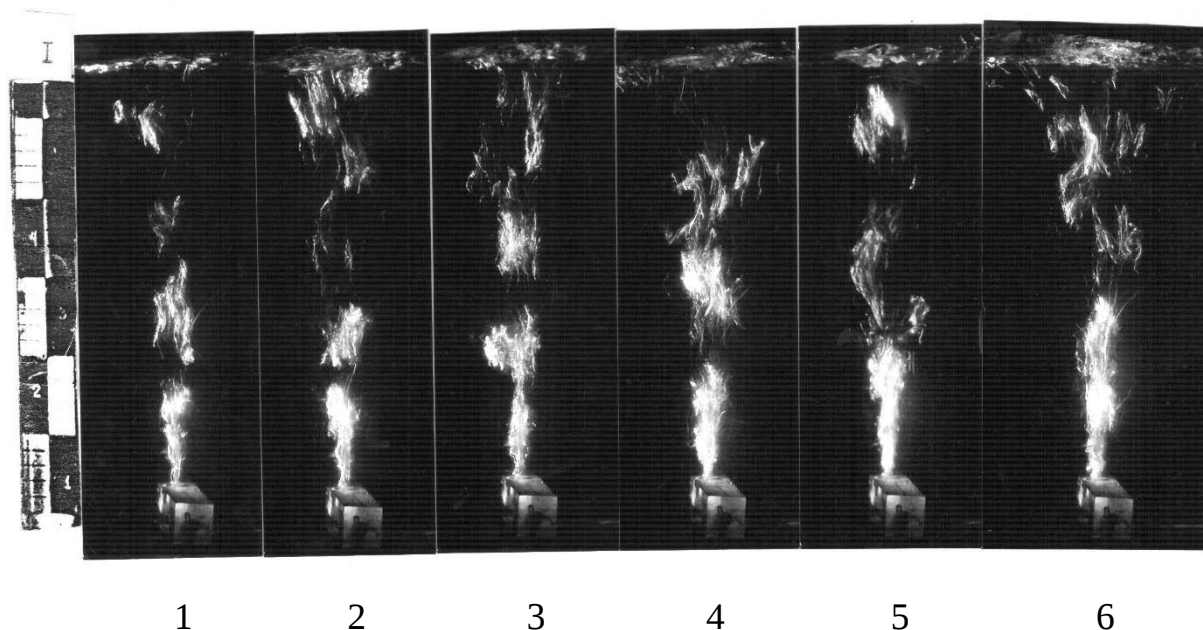


Рисунок 4.3 – Особливості формування газорідинної течії (на моделі) при вертикальному підводі повітря в залежності від величини тиску в ресивері.

Отже, можна зробити висновок, що ефективна газо-рідинна бульбашкова течія має місце у верхній частині рідкого середовища. Отримані дані також дозволяють встановити, що при 1–2 рівні тиску P або витраті Q_g , коливання поверхні рідкої фази мінімальне.

Наступна серія експериментів була присвячена визначенню оптимальної відстані ΔL між поздовжніми осями двох поруч розташованих каналів для підведення газу. На рис. 4.4 показані особливості взаємодії двох газових струменів в залежності від величини ΔL .

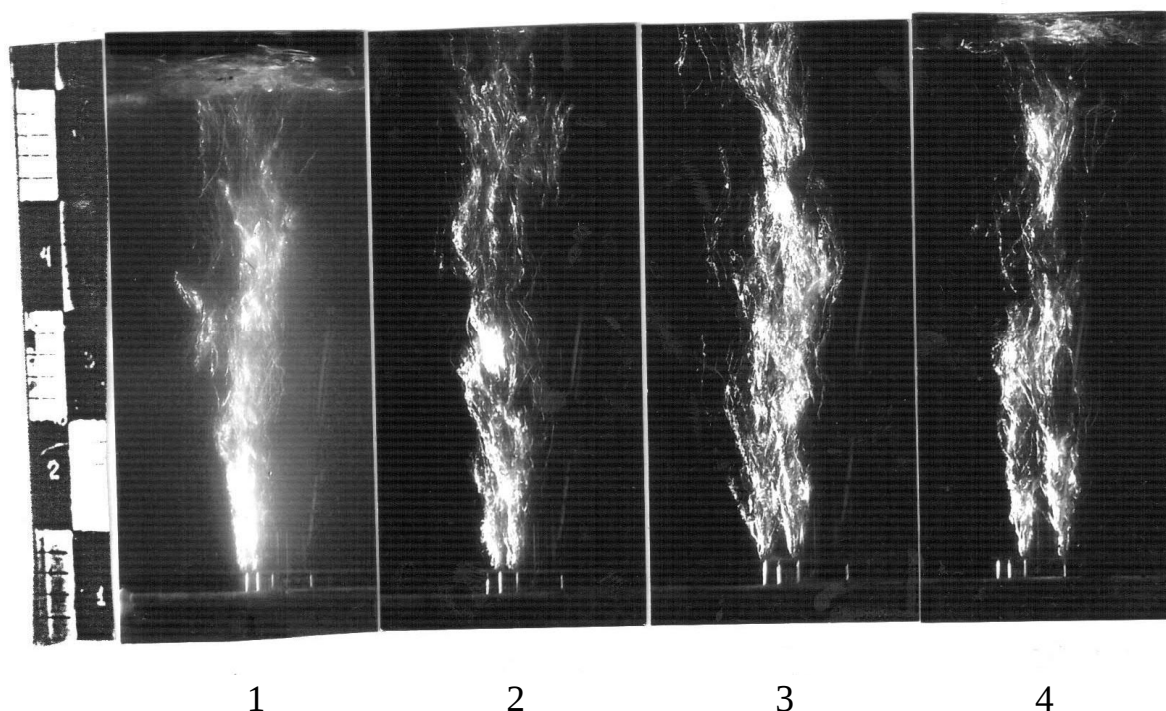


Рисунок 4.4 – Особливості витікання двох газових струменів в залежності від відстані між вертикальними каналами. Відстань між каналами: 1 – $10 d_0$; 2 – $20 d_0$; 3 – $30 d_0$; 4 – $40 d_0$ (d_0 – діаметр вихідного перетину каналу).

Для відносно малої відстані ΔL , рівної $10 d_0$, спостерігається злиття газових потоків в один, внаслідок чого умови їх розпаду на окремі бульбашки ускладнюються. Збільшення відстані ΔL до $20\text{--}40 d_0$ зменшує ступінь взаємного впливу газових струменів на процеси розпаду. При цьому слід зазначити, що при ΔL більше $40 d_0$ взаємодія газових потоків практично не спостерігається.

Сучасні уявлення про поширення газових струменів в рідині свідчать, що існування факела струменя (або «струменевого» витікання), його протяжність і подальший розпад на певні відокремлені газові об'єми різної величини (в граничному описі – бульбашки газу) залежить від величини вертикальної швидкості v_0 в початковому перерізі. Тобто, чим менше значення v_0 , тим менше довжина факела газового струменя, тим на більший об'єм рідини впливають бульбашки газу [116, 117, 125]. Зменшення вертикальної складової

швидкості v_0 може бути досягнуто за умови, коли окремі газові струмені спрямовано під певним кутом α до вертикалі.

На рис. 4.5 наведені фотографії поширення газового струменя, що витікає в рідину під кутом 30° – 60° до вертикалі. За даними, представленими на фотографіях, можна констатувати відсутність факела і розпад газового струменя на окремі скупчення бульбашок при всіх досліджуваних кутах введення газу.

При розташуванні відповідних отворів кожного ряду в одній вертикальній поздовжній площині взаємодія двох газових струменів при кутах введення 45° і 60° не спостерігається (рис. 4.2а). У разі, коли отвори зміщені один щодо іншого на величину $\Delta L/2$, взаємодія відповідних газових струменів практично відсутня при всіх значеннях досліджуваних кутів (рис. 4.2б).

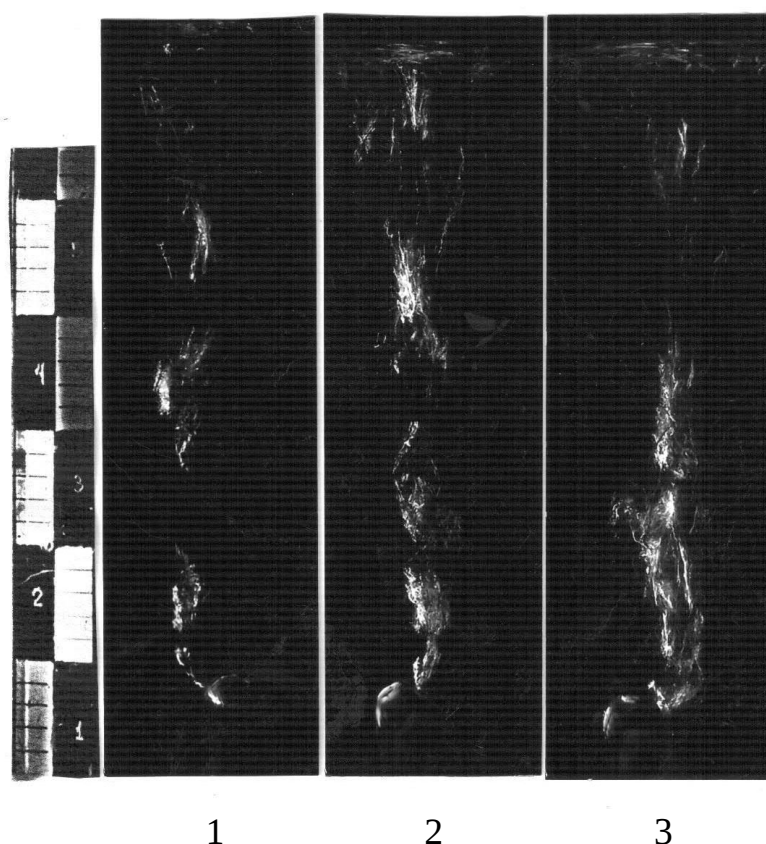


Рисунок 4.5 – Поширення газового струменя в рідині, який спрямовано під кутом α до вертикалі: 1 – 30° ; 2 – 45° ; 3 – 60° .

Для непрямої оцінки взаємодії газової фази з рідиною був проведений окремий експеримент по введенню газового струменя в режимі подачі газу протягом фіксованого часового інтервалу тривалістю 0.2 с. Досліджувалося зародження і рух газової фази в рідині при вертикальному підводі та під кутом 45° при інших рівних умовах за допомогою відеозйомки (рис. 4.6).

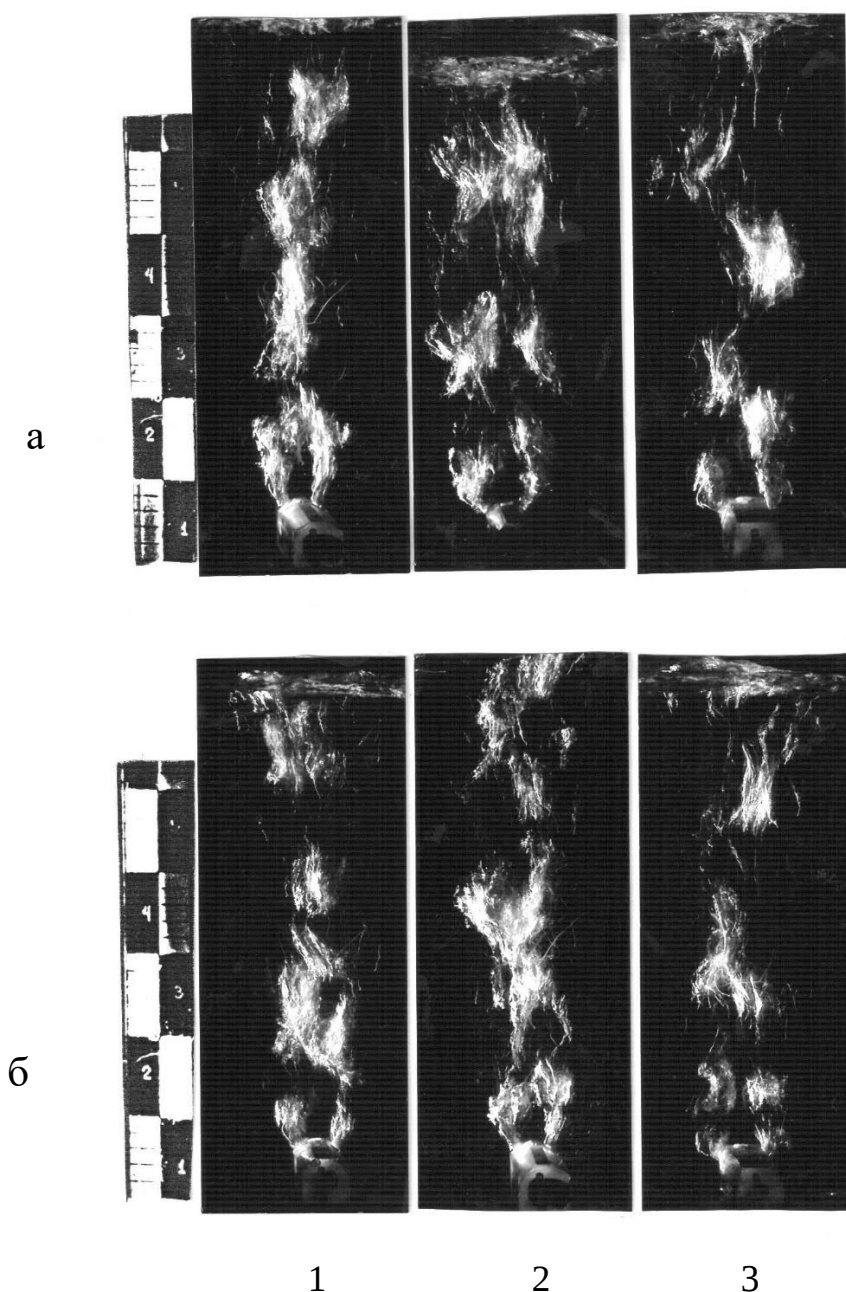
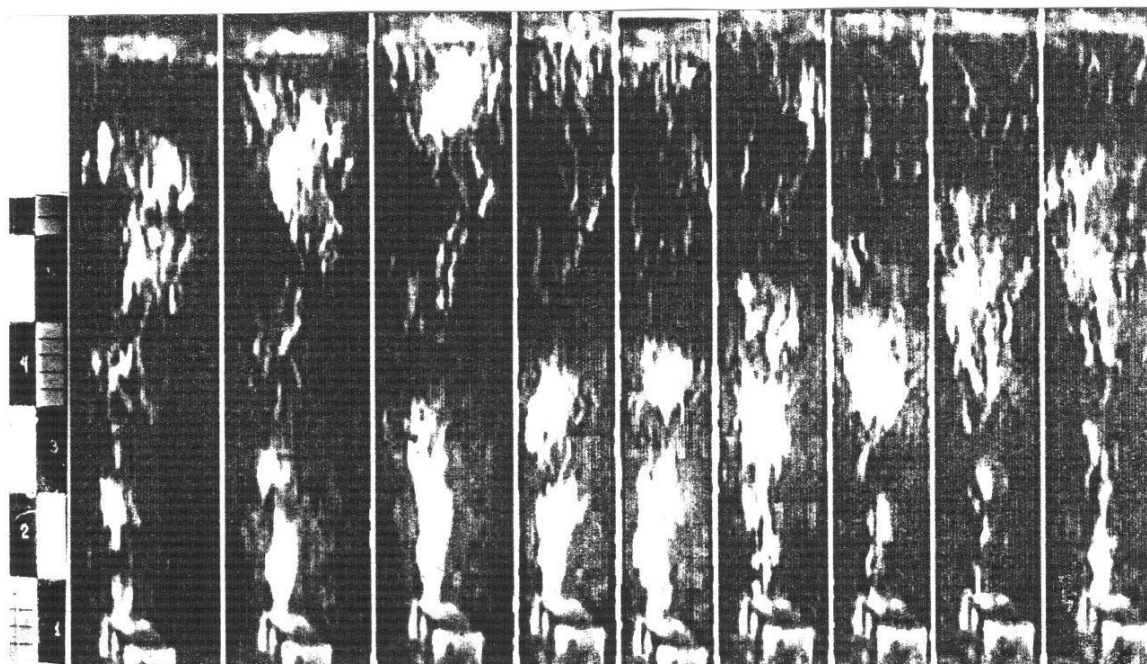
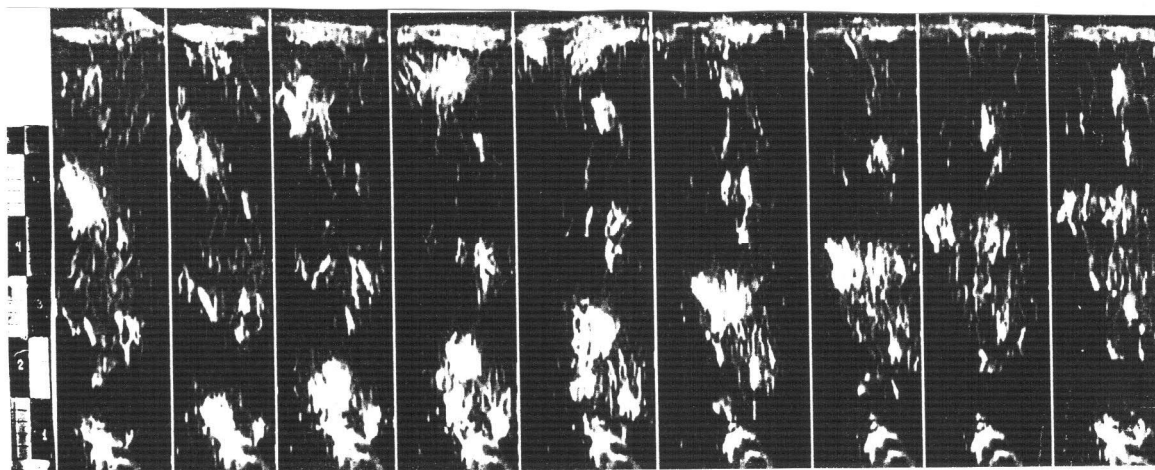


Рисунок 4.6 – Витікання двох газових струменів в рідину, кожний з яких спрямований під кутом α до вертикалі: 1 – 30° ; 2 – 45° ; 3 – 60° . Взаємне розташування каналів, що формують струмені (відповідно до рис. 4.2): а – перетин 1–1; б – перетин 2–2.

Швидкість руху факела вертикального газового струменя на моделі становить 0.7 м/с, а похилого – 0.35–0.40 м/с (див. рис. 4.7).



а



б

Рисунок 4.7 – Початкова стадія формування газо-рідинних потоків: а – вертикальний газовий струмінь; б – подача газового струменя під кутом 45° (тривалість одного кадру – 0.04 с).

Зниження вертикальної швидкості руху газового факела в другому випадку можна пояснити великим об'ємом рідини, що залучається в газорідинну течію у якості приєднаної маси та переважно бульбашковим режимом руху газової фази, коли спливання обмежено динамікою руху окремих бульбашок, гранична швидкість якого нижча, що було показано в розрахунках у розділі 2 на підставі систематизованих емпіричних даних наявних попередніх досліджень інших авторів [64, 76, 78, 117, 120, 126, 127]. Проведені експерименти наочно показують перевагу введення газового струменя під кутом до вертикалі, оскільки в цьому випадку забезпечується більш ефективне формування бульбашкового режиму течії.

Отже, проведені дослідження дають можливість встановити всі необхідні конструктивні і режимні параметри для розробки спеціальної конструкції фурми і режимів продувки сталі аргоном при її рафінуванні в проміжному ковші в процесі розливання на МБРЗ.

4.2 Гідродинамічні процеси в проміжному ковші при різних режимах продувки

Обрана конструкція продувного блоку повинна забезпечити розпад газового струменя на скупчення окремих бульбашок і відповідний бульбашковий режим газової фази практично по всій глибині металу в ванні проміжного ковша [22], що буде відповідати припущенням обраної математичної моделі. Умовою цього є дотримання розглянутих в розділі 2 обмежень, що визначають даний режим та застосування продувного блоку запропонованого у п. 4.1:

- верхня межа витрати газу до $0.65\text{--}0.7\text{ л/}(\text{хв}\cdot\text{см}^2)$ в перерізі поверхні продувного блоку;
- діаметр бульбашок в момент відриву від поверхні продувного блоку не менше $4.7\text{--}5.2\text{ мм}$ і не менше $10\text{--}11\text{ мм}$ в зоні розділу «метал – шлак».

Відповідно до теорії струменевих течій, що розвиваються в обмеженому просторі [129], в об'ємі розплаву в порожнині проміжного ковша можна виділити наступні характерні зони (рис. 4.8):

1. зона прямого (транзитного) потоку довжиною L ;
2. зона зворотного (циркуляційного) потоку;
3. ділянка, де зона 2 захоплює рідкий метал;
4. ділянка, розташована у верхній частині зони зворотного потоку поблизу перегородки, де відбувається поповнення прямої течії за рахунок рідкого металу із зони зворотної циркуляції.

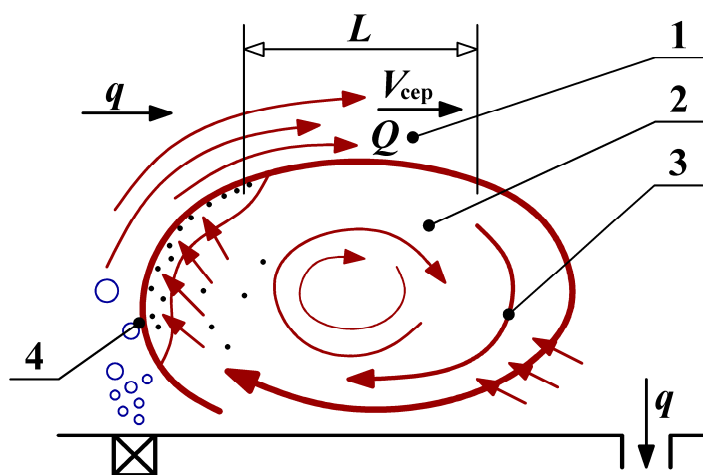


Рисунок 4.8 – Характерні зони течій в обмеженому просторі проміжного ковша МБРЗ.

В межах зони зворотного потоку відбувається спливання неметалічних включень і їх можлива коагуляція (зростання розмірів). В межах ділянки 4 відбувається поповнення прямої течії рідким металом із зони зворотної циркуляції, що збагачений великими частками неметалічних включень.

Відповідно до припущених умов продувки і конфігурації продувного блоку були виконані шість серій обчислювальних експериментів для різних режимів продування і розташування продувного блоку (опис серій див. нижче):

- інтенсивність продувки варіювалася від 2 м³/год до 6 м³/год на один продувний блок;
- розглянуто стаціонарний робочий рівень заповнення промковша, а також знижений рівень, що відповідає умовам перековшовки;
- розглянуті варіанти з наявністю і відсутністю вставки, що обмежує турбулентну придонну ділянку течії в області удару струменя об днище проміжного ковша.

Профілі течії за результатами моделювання представлені на рис. 4.9. Як і в розділі 3 вони відповідають наступним конфігураціям: двострумковому проміжному ковшу без внутрішніх конструктивних елементів, промковшу з типовою вставкою (турбостоп), що обмежує придонну турбулентну ділянку струменя, а також декільком варіантам з варійованим нахилом площини вставки.

Для розглянутих у даному розділі варіантів також виділена множина характерних поперечних вертикальних перетинів, для яких у потоках розплаву виявлено ідентичні особливості в більшості модельованих ситуацій (у порівнянні з попереднім розділом множина перетинів доповнена перетином в околі розташування продувного блоку):

△ – перетин через центр внутрішньої (першої) зони (зворотної) циркуляції;

× – перетин в околі розташування продувного блоку;

□ – перетин через центр зовнішньої (другої) зони (прямої) циркуляції;

⊕ – додатковий перетин в околі характерної (другорядної) неоднорідності потоків;

○ – перетин через центр розливного стакану.

В даному випадку крім основних геометричних факторів газова фаза, що спливає в поперечному перерізі, є чинником, що стимулює великогабаритну фрагментацію течії розплаву. Має місце поділ всієї маси металу на течію до і після «газової завіси».

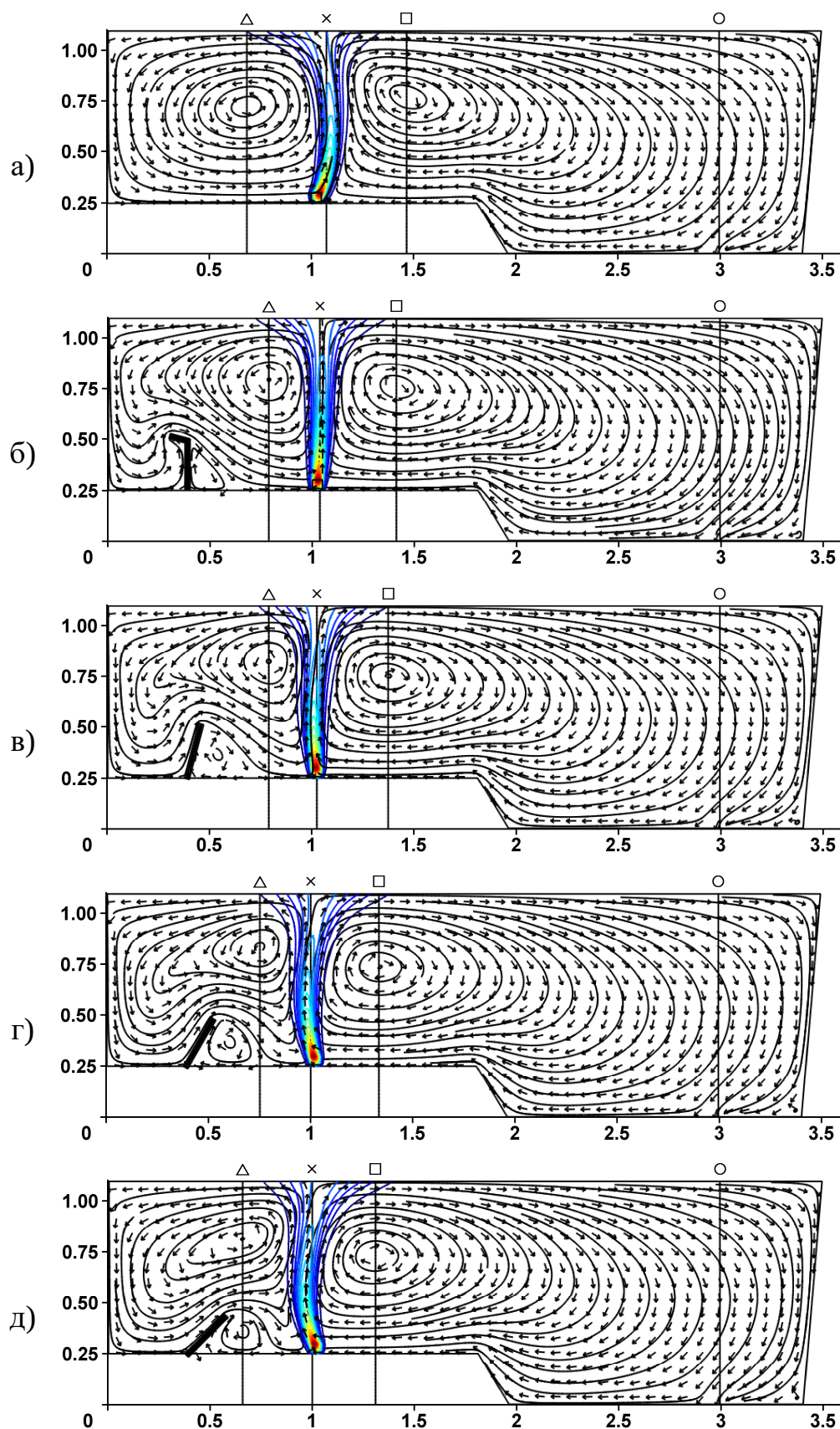


Рисунок 4.9 – Структура течій з продувкою аргоном: а – порожній промковщ; б – вставка типу «турбостоп»; в–д – похилі вставки 15°, 30° і 45°.

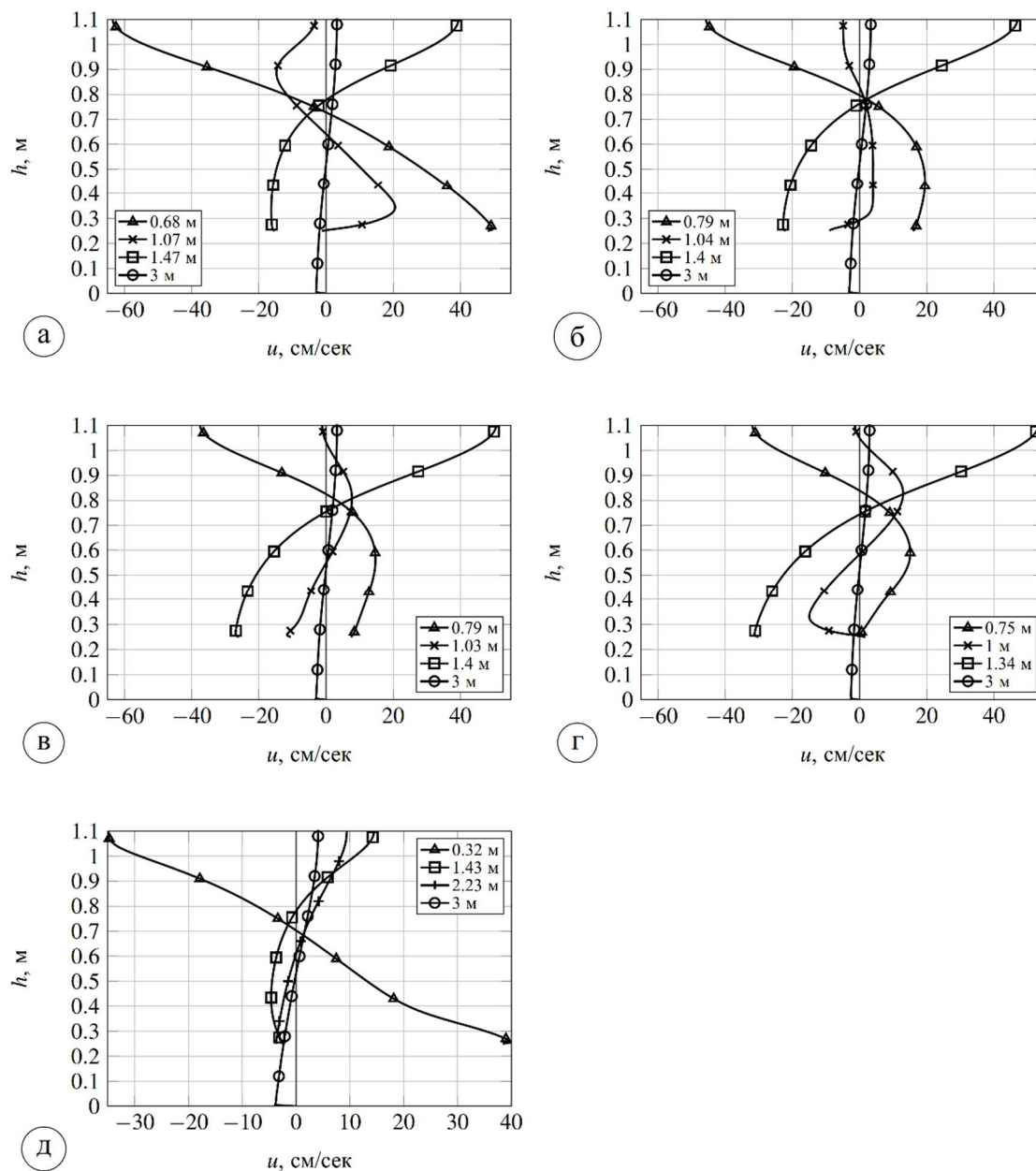


Рисунок 4.10 – Горизонтальна складова швидкості руху потоків розплаву в характерних вертикальних поперечних перетинах проміжного ковша з продувкою: а – порожній промковш; б – зі вставкою «турбостоп»; в – зі вставкою з нахилом граней відносно вертикального поперечного перерізу в 15° ; г – зі вставкою з нахилом в 30° ; д – зі вставкою з нахилом в 45° .

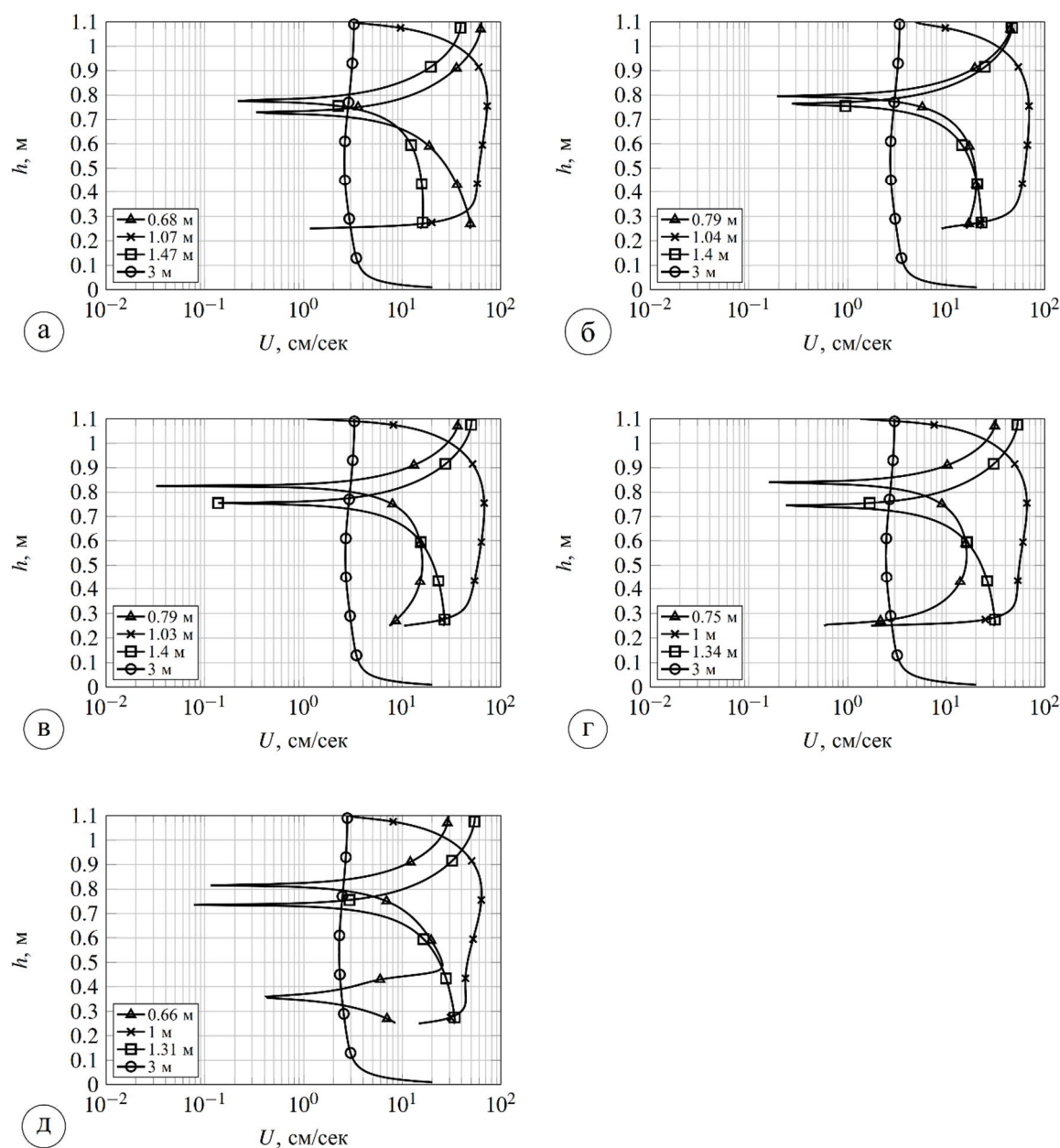


Рисунок 4.11 – Абсолютні значення швидкості руху потоків розплаву в характерних вертикальних поперечних перетинах проміжного ковша з продувкою: а – порожній промковш; б – зі вставкою «турбостоп»; в – зі вставкою з нахилом граней щодо вертикального поперечного перерізу в 15° ; г – зі вставкою з нахилом в 30° ; д – зі вставкою з нахилом в 45° .

На рисунку 4.11 показані питомі значення кінетичної енергії потоків, осереднених за об'ємом проміжного ковша для різних варіантів: порожній промковш, вставка типу «турбостоп» і серія варіантів гладких вставок з різним нахилом (0° – 45°). Лінії відповідають енергії руху усередненого потоку (E), турбулентним пульсаціям (k) і сумарній кінетичній енергії залученої в рух маси розплаву ($E+k$).

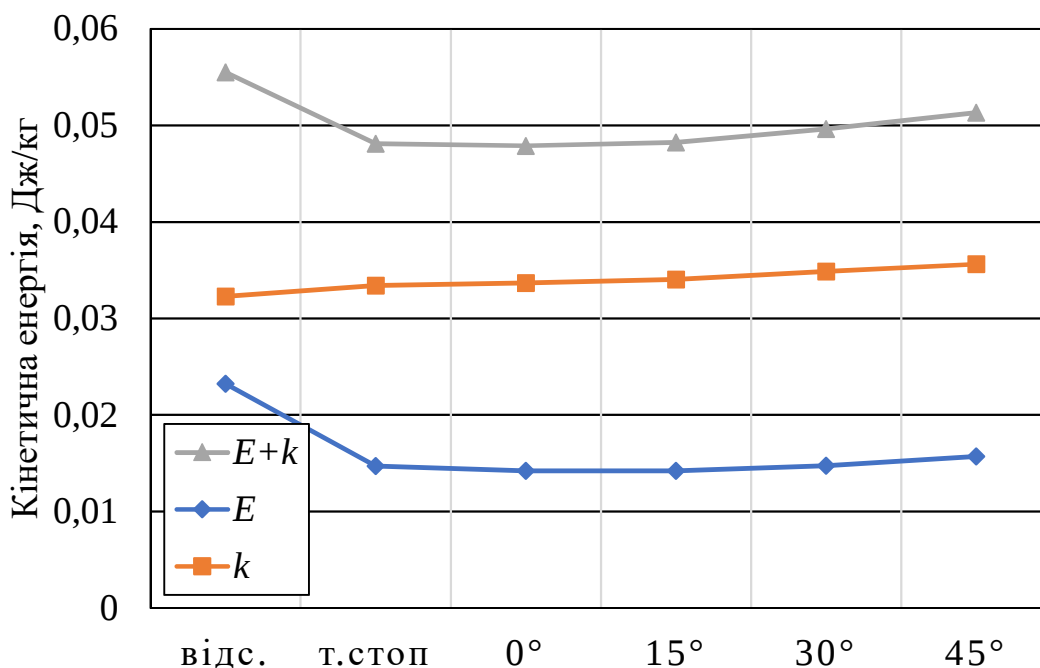


Рисунок 4.12 – Питомі значення кінетичної енергії потоків, осереднених за об'ємом проміжного ковша для різних варіантів: порожній промковш (відс.), промковш зі вставкою «турбостоп» (т.стоп) і серія варіантів вставок з гладкою кромкою і різним нахилом (0° – 45°). Графіки відповідають кінетичній енергії усередненого руху потоку (E), турбулентним пульсаціям (k) і сумарній кінетичній енергії залученої в рух маси розплаву ($E+k$).

Як видно з графіків на рис. 4.12, в разі присутності збурення потоків газовою фазою, що спливає, застосування обмежуючої турбулентності вставки «турбостоп» не дає зниження турбулізації розплаву. Очікуваний ефект нівелюється присутністю додаткового фактору турбулізації розплаву у вигляді спливаючих газових бульбашок.

При цьому загальна інтенсивність циркуляційних потоків в промковші знижується на 36 % за рахунок обмеження безперешкодного поширення затопленого струменя з стальковша.

Завдяки внесенню в об'єм розплаву додаткового імпульсу разом з потоком аргону, а також за рахунок його теплового розширення і бульбашкового характеру руху газової фази, кінетична енергія турбулентного руху в разі продувки перевищує більш ніж в 2.35 рази енергію усередненого руху, який також інтенсифікується з введенням газової фази в 2–9 (~ 4.6) разів в залежності від конфігурації вбудованих елементів (див. рис. 4.12).

Отже, спостерігається сукупне збільшення інтенсивності циркуляційних процесів в проміжному ковші з ростом кінетичної енергії в 5–16 разів і значним зростом, розосередженої турбулізації розплаву, що не є локалізованою в околі придонних потоків, з переносом зони максимуму інтенсивності в приповерхневу область контакту зі шлаком.

Варіювання кута нахилу стінки, що обмежує спадаючий струмінь, в діапазоні 0° – 45° по відношенню до вертикального положення, зберігає тенденцію до ослаблення ефекту «турбостоп», однак на тлі загальної турбулізації розплаву продуванням цей вплив дуже малий.

При цьому виходячи з значень усереднених швидкостей руху розплаву впливає, що в присутності продувки за допомогою такого варіювання конфігурації відбійника в області падіння струменя можна керувати інтенсивністю циркуляційних процесів.

Профілі течії на рис. 4.12 відповідають проміжному ковшу без донних уступів в околі розливних стаканів з еквівалентним попередньому випадку тоннажем і пропорційній йому висотою рівня розплаву, як і в попередньому випадку розглянуто варіант без внутрішніх конструктивних елементів, варіант зі вставкою «турбостоп», а також варіанти з варійованим нахилом бічних стінок вставки.

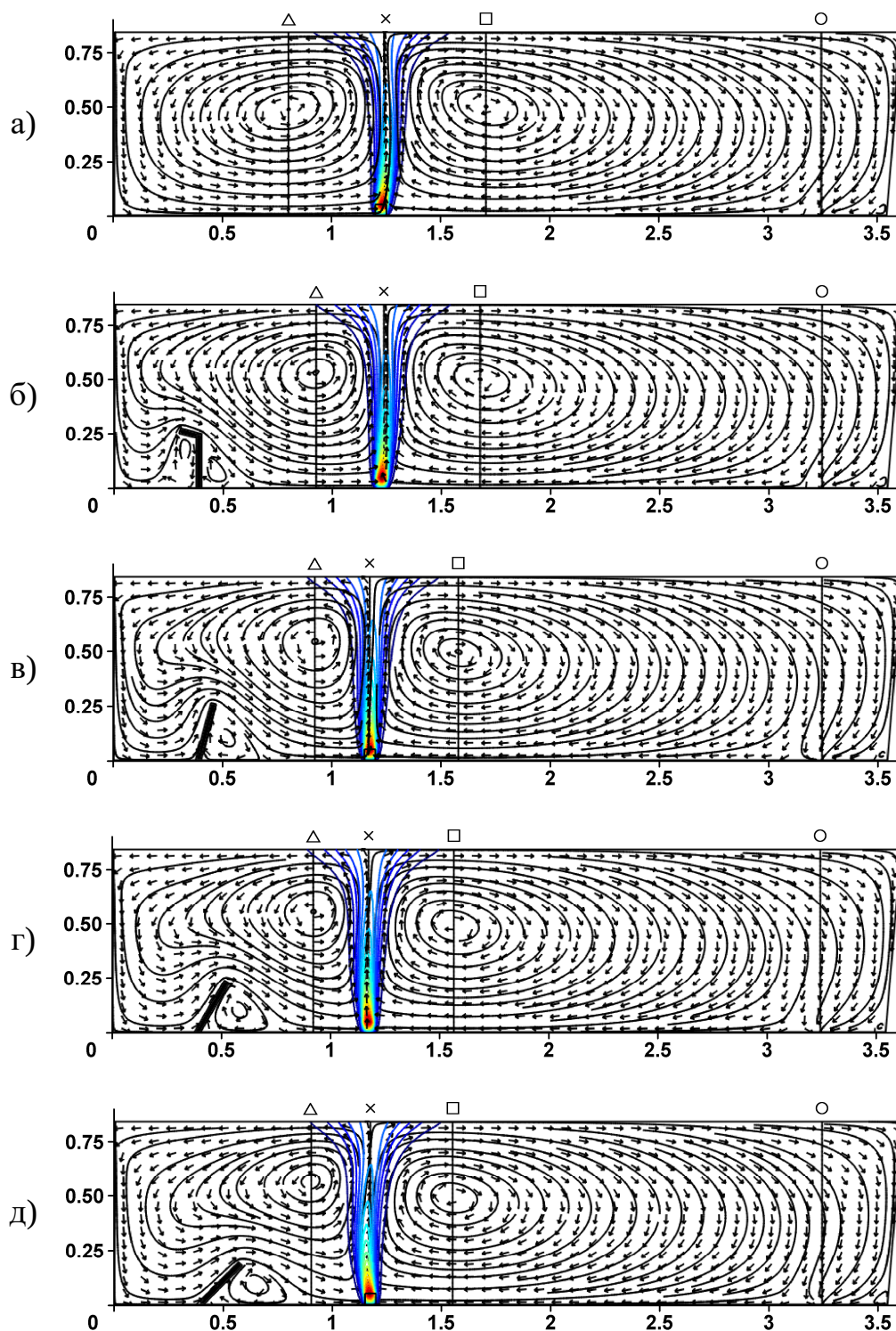


Рисунок 4.13 – Структура течій з продувкою аргоном: а – порожній промковш; б – вставка типу «турбостоп»; в–д – похилі вставки 15°, 30° і 45°.

Аналогічно попередньому випадку побудовані епюри горизонтальних складових швидкості розплаву в характерних перетинах, а також абсолютні значення усереднених швидкостей в тих же перетинах, які наведені на рис. 4.14 і 4.15.

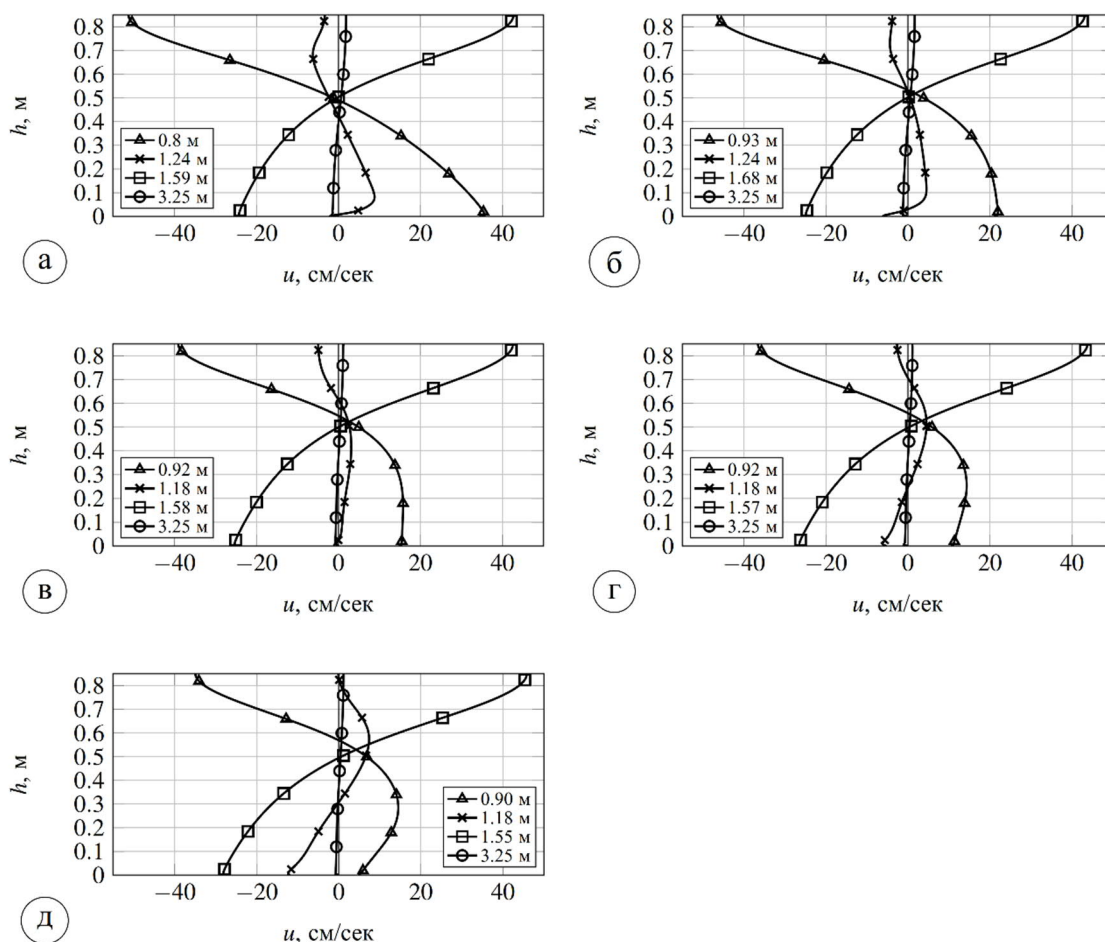


Рисунок 4.14 – Горизонтальна складова швидкості руху потоків розплаву в характерних вертикальних поперечних перетинах проміжного ковша з продувкою: а – порожній промковш; б – зі вставкою «турбостоп»; в – зі вставкою з нахилом граней відносно вертикального поперечного перетину в 15° ; г – зі вставкою з нахилом в 30° ; д – зі вставкою з нахилом в 45° .

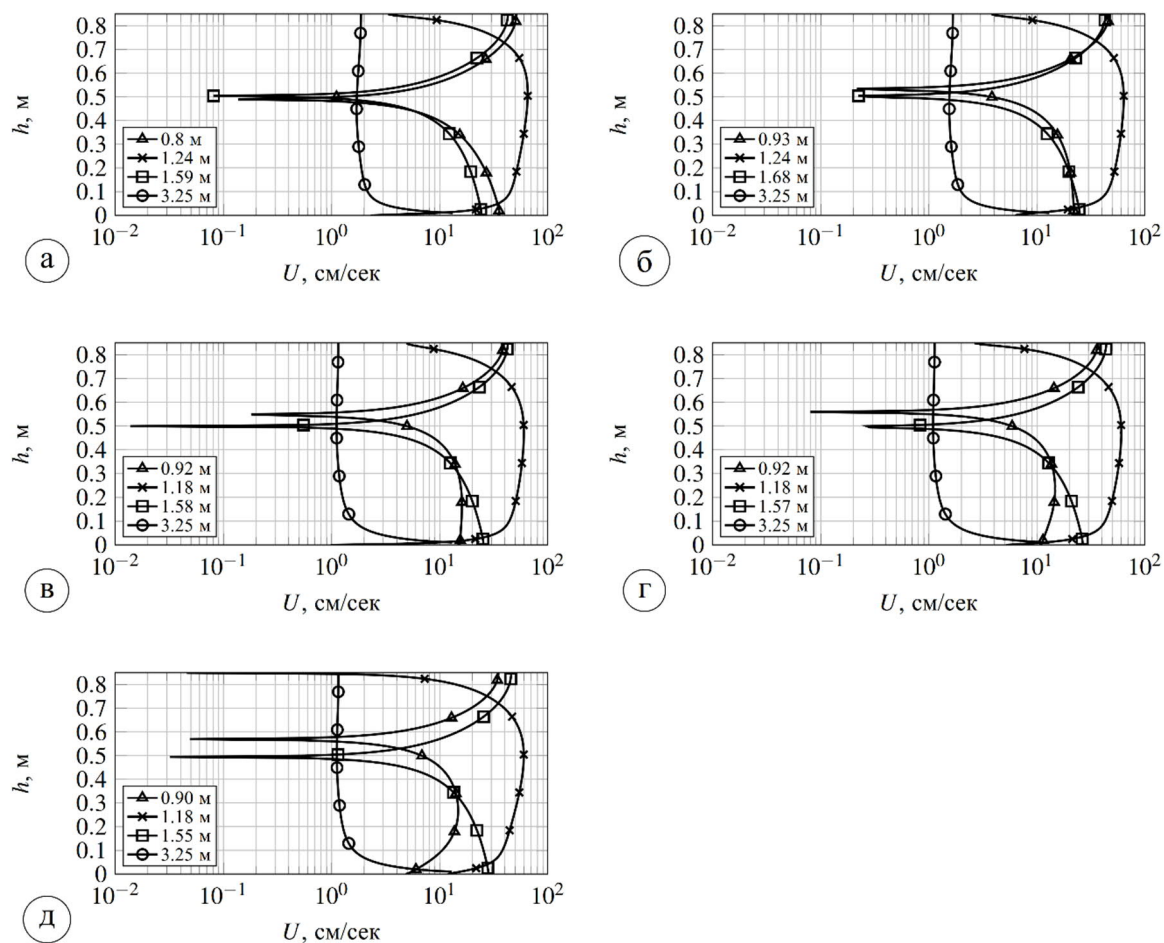


Рисунок 4.15 – Абсолютні значення швидкості руху потоків розплаву в характерних вертикальних поперечних перетинах проміжного ковша з продувкою: а – порожній промковш; б – зі вставкою «турбостоп»; в – зі вставкою з нахилом граней відносно вертикального поперечного перетину в 15° ; г – зі вставкою з нахилом в 30° ; д – зі вставкою з нахилом в 45° .

Питомі значення кінетичної енергії потоків, осереднених за об'ємом проміжного ковша даної конфігурації для різних варіантів: порожній промковш, вставка типу «турбостоп» і серія варіантів гладких вставок з різних нахилом (0° – 45°) показані на рис. 4.16. Лінії відповідають кінетичній енергії усередненого руху потоку (E), турбулентним пульсаціям (k) і сумарній кінетичній енергії залученої в рух маси розплаву ($E+k$).

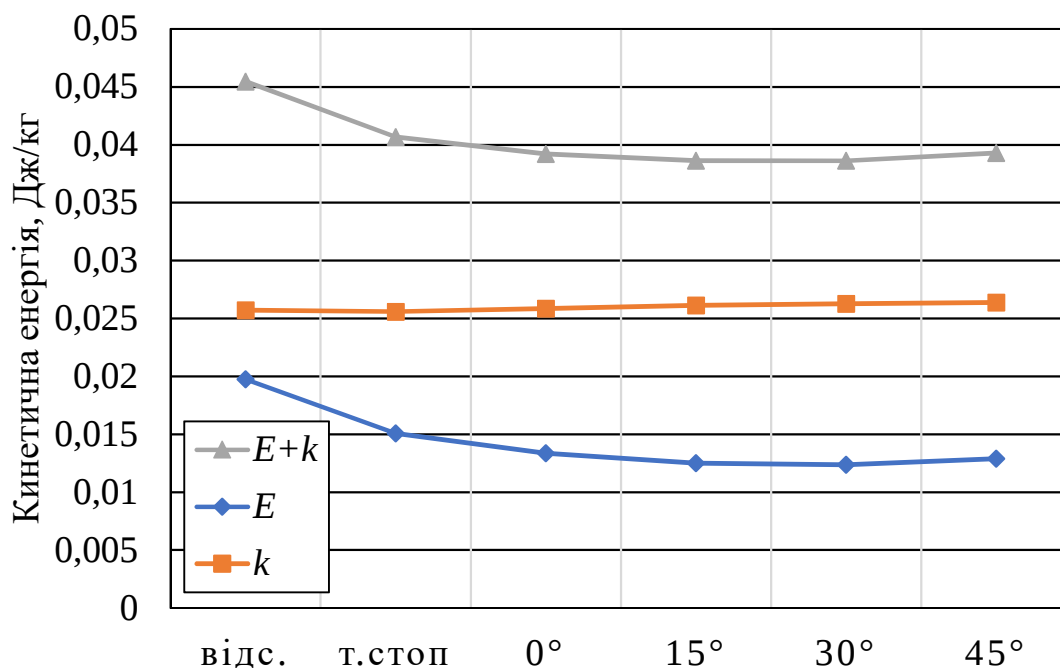


Рисунок 4.16 – Питомі значення кінетичної енергії потоків, осереднених за об'ємом проміжного ковша для різних варіантів: порожній промковш (відс.), промковш зі вставкою «турбостоп» (т.стоп) і серія варіантів вставок з гладкою кромкою і різним нахилом (0° – 45°).

Застосування вставки «турбостоп», що обмежує турбулентність, забезпечує зниження турбулізації розплаву на 54% і також призводить до трикратного падіння загальної інтенсивності процесів перемішування в порожнині промковша, тим самим енергетично урівнюючи турбулізацію розплаву з осередненим рухом в промковші.

Все, що стосується виявлених в першій серії моделювання закономірностей, залишається справедливим для другої серії зі зміненою геометрією промковша.

Варіювання кута нахилу стінок вбудованого елемента призводить до тієї ж тенденції ослаблення ефективності «турбостоп». Турбулізація зберігається в тих же межах 50–75 % від турбулізації розплаву в промковші без вбудованих елементів.

Спостерігається також майже лінійний приріст енергії залученого в рух об'єму розплаву по мірі відхилення стінок вбудованого елемента, що відбивають потік.

Для визначення ефективності видалення неметалічних включень в проміжному ковші МБРЗ можна виділити епюру горизонтальної (поздовжньої) швидкості v_x в вертикальному перерізі y , що проходить через центр зони зворотної циркуляції.

На рис. 4.17 а показано розподіл швидкості v_x без продувки, на рис. 4.17 б – з продувкою. Слід зазначити, що глибина зони прямого потоку без продувки в кілька разів більше, ніж з продувкою. При цьому при середній швидкості течії рідкого металу в зазначених зонах 0.02 і 0.2 м/с, відповідно, час перебування частинки, розташованої на нижньому горизонті, в зоні прямої течії в першому випадку буде значно більше. Швидкість подолання частинкою глибини зони прямої течії з початкового рівня до межі розділу «метал – шлак» буде дорівнювати 0.004 м/с і 0.0125 м/с відповідно.

Тобто можна стверджувати, що з високою мірою ймовірності частинки діаметром більше $(0,08-0,10) \times 10^{-3}$ м для варіанту без продувки і $(0,10-0,12) \times 10^{-3}$ м у разі продувки будуть видалятися повністю.

Наведені розмірковування з приводу оцінки розмірів частинок, що видаляються, відповідають моделі «ідеального» видалення. Але в дійсності слід враховувати існування зони зворотної циркуляції. Зокрема, коефіцієнт обміну $K_{об}$ можна обчислити за наведеними епюрами швидкості за формулою

$$K_{об} = \frac{Q_{тр} - q}{q}, \quad (4.1)$$

де $Q_{тр}$ – витрата прямого потоку, $\text{м}^3/\text{с}$; q – витрата розплаву, який надходить в проміжний ківш і далі йде в кристалізатор, $\text{м}^3/\text{с}$.

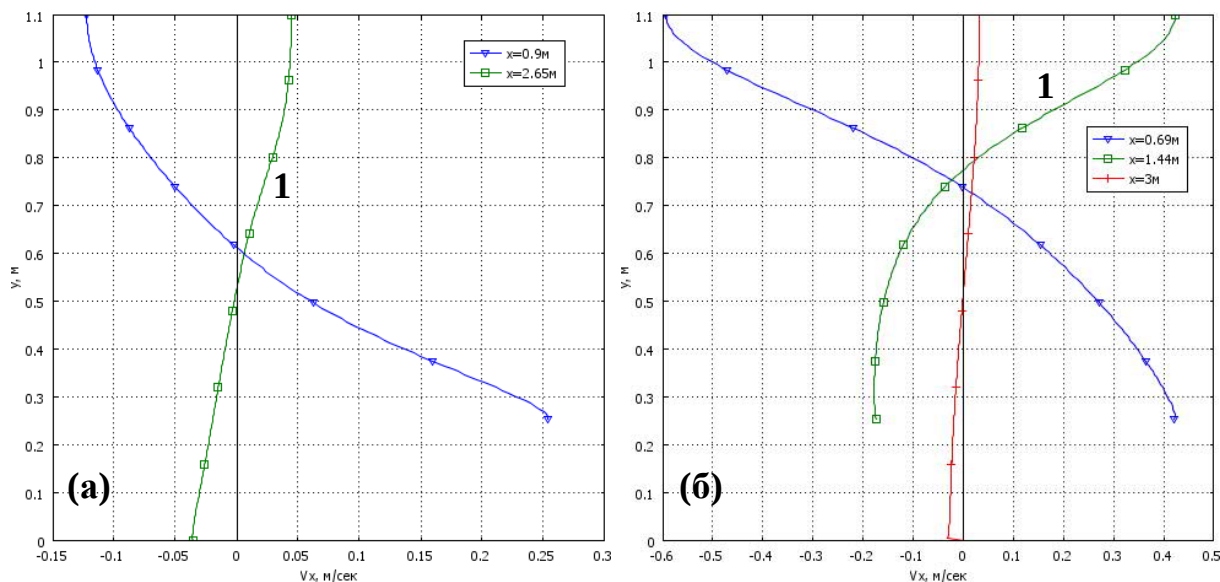


Рисунок 4.17 – Епюри горизонтальної швидкості v_x в вертикальному перерізі у, що проходить через центр зони зворотної циркуляції (1):
а – без продувки (див. рис. 3.1, а); б – з продувкою (див. рис. 3.1, б).

Отримані дані показують, що величина діаметра включень, що повністю видаляються, вище, ніж для випадку без урахування циркуляції і становить $(0,13-0,15) \times 10^{-3}$ м.

Як було показано в [18], динамічні сили незначно впливають на рух НВ невеликих розмірів, ускладнюючи їх проникнення глибоко в шлак.

Для пояснення явища видалення таких неметалічних включень треба врахувати основні закономірності утворення і руху газоподібних сферичних тіл в багатофазному середовищі.

В момент утворення газових бульбашок рідка фаза, яка містить включення, витісняється в прикордонну зону сферичного тіла. При цьому за газовою бульбашкою рухається об'єм рідини (приєднана маса), що дорівнює

0.5 об'єму газової бульбашки і збагачений неметалічними включеннями, які «стікають» з сферичної поверхні в зоні відриву граничного шару [130, 131].

При наявності продувки при оптимальному віддаленні продувного блоку від осі струменя зі стальковша, що згідно результатів моделювання дорівнює 0.9–1.1 м для 43-тонного промковша з уступом та 1.1–1.3 м для конфігурації з плоским дном, можна отримати зону прямого потоку максимальної довжини. При цьому значно збільшується коефіцієнт рециркуляції в зоні зворотного потоку.

Якщо виконати умову, щоб весь об'єм металу, що надходить в проміжний ківш, транспортувався в зону розділу «метал – шлак», як приєднана маса, то для цього необхідно подати витрату газу у вигляді сукупності окремих бульбашок (з урахуванням теплового розширення при температурі середовища) в 2 рази більшу, ніж об'ємна витрата металу. Що в перерахунку на умови холодного аргону, що подається, відповідає 6–7 м³/год. Близьке до цієї величини значення витрати газу отримано з умови мінімізації збурень на межі розділу «метал – шлак» [22].

4.3 Аналіз енергетичних характеристик процесів у проміжному ковші з різними параметрами конфігурації та продувки

Для аналізу впливу гідрогазодинамічних потоків, що розвиваються в обмеженому просторі проміжного ковша МБРЗ, на інтенсивність теплообміну і процес видалення неметалічних включень застосуємо критерії на основі інтегральних величин значень питомої кінетичної енергії усередненого руху K і питомої кінетичної енергії турбулентного руху K_T характерних зон (Ω) течії (рис. 4.18):

$$K = \frac{1}{2S} \iint_{\Omega} (u^2 + v^2) dx dy; \quad K_T = \frac{1}{S} \iint_{\Omega} k dx dy, \quad (4.2)$$

де u , v , k – локальні значення проєкцій швидкості і кінетичної енергії

турбулентного руху, що одержуються з моделі $k-\varepsilon$, відповідно; $S = \iint_{\Omega} dx dy$ – площа виділеної зони течії Ω . Інтеграли наведені для випадку модельної задачі, що розглядається в роботі (див. розділ 2).

Виділення характерних зон (рис. 4.15) виконаємо за допомогою контурів попередньо побудованих ізоліній, що проходять по границях розділу циркуляційних і прямих течій. Якщо маса металу в ковші $M = 40000$ кг, то кінетичну енергію зони з площею S можна визначити за допомогою формули

$$K_{\text{зони}} = \frac{M}{S} K. \quad (4.3)$$

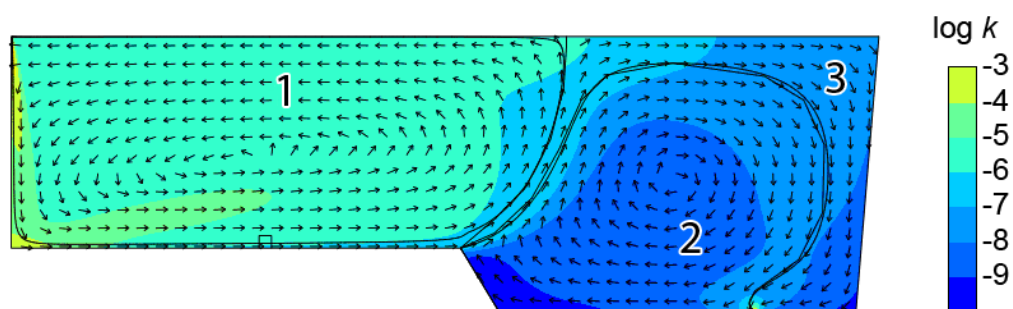


Рисунок 4.18 – Визначення характерних зон потоків розплаву за допомогою пограничних ізоліній: 1, 2 – зони циркуляції (Ω_1 і Ω_2);
3 – зона прямої течії (Ω_3).

Використовуючи запропонований метод проведемо обробку і аналіз результатів моделювання для різних комбінацій конфігурації і режимів роботи проміжного ковша, розглянутих вище в цьому розділі та в розділі 3.

Результати обробки згрупуємо в декілька таблиць відповідно до комбінацій аналізованих умов:

- серія 1 (таблиця 4.1) відповідає стандартному двострумковому проміжному ковшу з донним уступом в області розливних стаканів без внутрішніх конструктивних елементів, а також вставці (турбостоп), що обмежує придонну турбулентну ділянку струменя, що надходить, типу FOSECO;

- серія 2 (таблиця 4.2) – стандартному двострумковому проміжному ковшу з донним уступом з альтернативною похилою вставкою, що обмежує придонну турбулентну ділянку струменя, що надходить для двох кутів нахилу її бічних поверхонь – 15° і 30° відповідно;
- серія 3 (таблиця 4.3) відповідає проміжному ковшу без донних уступів в околі розливних секцій з пропорційно зниженою висотою рівня розплаву, також без внутрішніх конструктивних елементів і з вставкою типу FOSECO;
- серія 4 (таблиця 4.4) відповідає проміжному ковшу без донних уступів, також без внутрішніх конструктивних елементів і з альтернативною похилою вставкою з двома кутами її нахилу 15° і 30° .

На рисунках 4.19–4.22 наведено відповідні переліченим вище серіям розрахунків розподіли турбулентної кінетичної енергії в двострумковому проміжному ковші з донним уступом та пласким дном.

На варіантах з першої серії (рис. 4.19) номерами 1–3 додатково позначено характерні зони течії, що виділені в об'ємі розплаву завдяки запропонованому у роботі методу.

Інформація про кінетичну енергію та енергію турбулентного руху в розплаві, що отримується в моделі, дозволяє визначати режими впливу на розплав, що забезпечують максимальну ефективність його взаємодії з шлаковим покриттям з метою видалення неметалічних включень і запобігання зтягування шлаку в розплав, а також запобігання виникненню застійних зон, що мають негативний вплив на теплову обстановку і теплову однорідність розплаву в проміжному ковші, особливо в перехідних режимах.

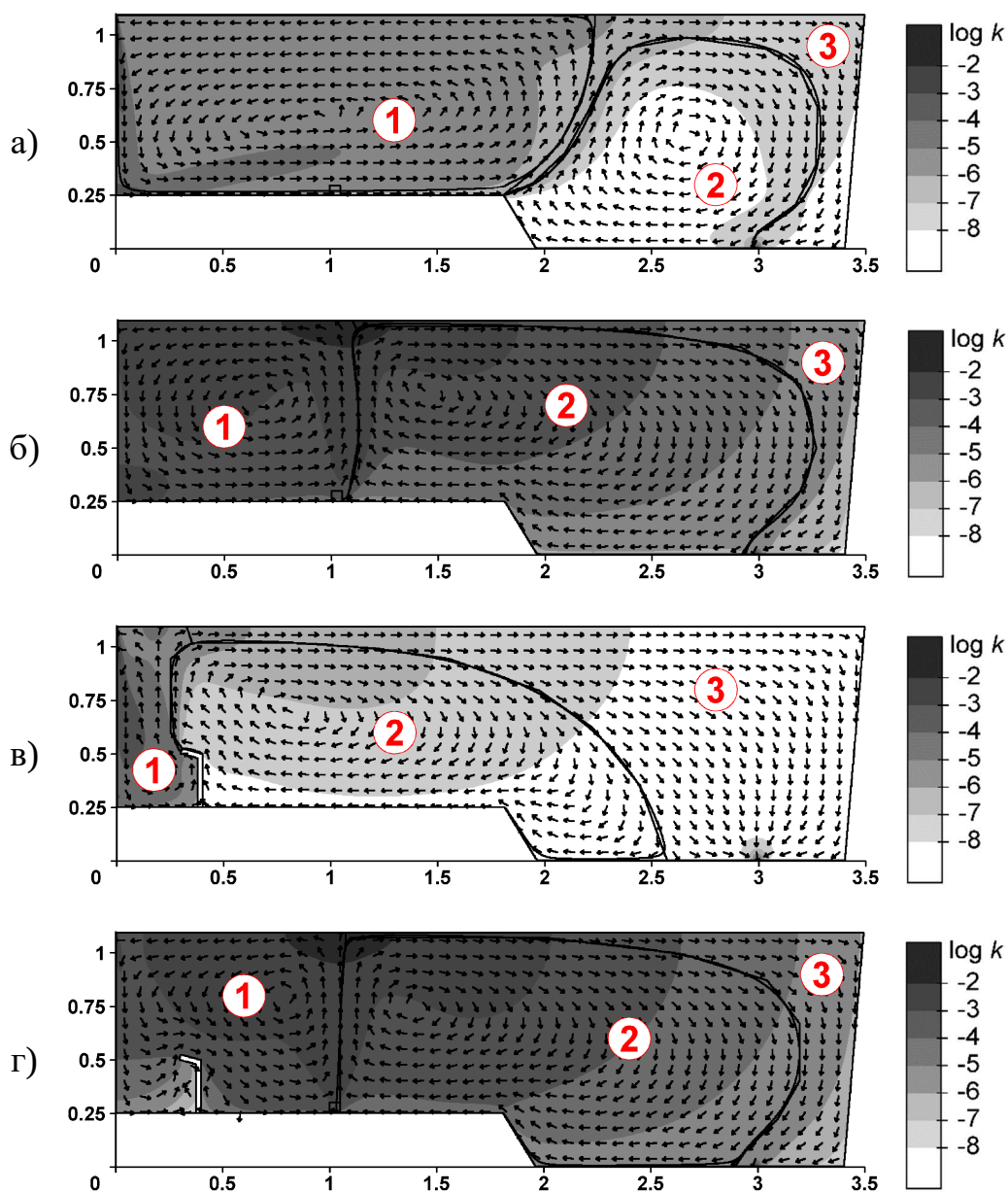


Рисунок 4.19 – Розподіл турбулентної кінетичної енергії в двострумковому проміжному ковші з донним уступом (серія 1): а – "порожній" промковщ; б – те ж, з продувкою; в – вставка типу «турбостоп»; г – те ж, з продувкою, відповідно. Цифрами 1–3 позначені виділені зони течії.

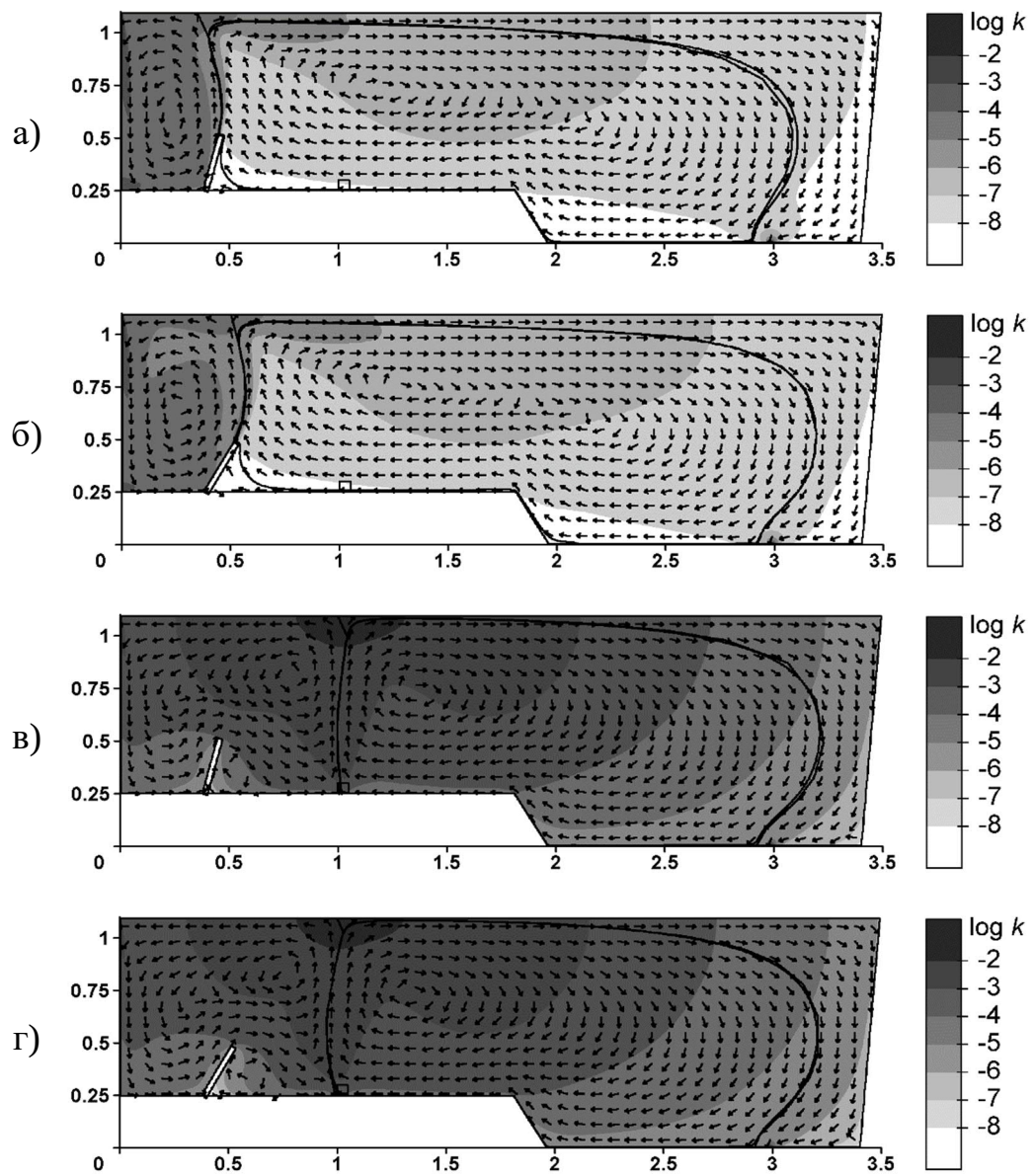


Рисунок 4.20 – Розподіл турбулентної кінетичної енергії в двострумковому проміжному ковші з донним уступом (серія 2): а – з вставкою з нахилом граней відносно вертикального поперечного перетину в 15° ; б – з вставкою з нахилом в 30° ; в, г – те ж саме, але з продувкою.

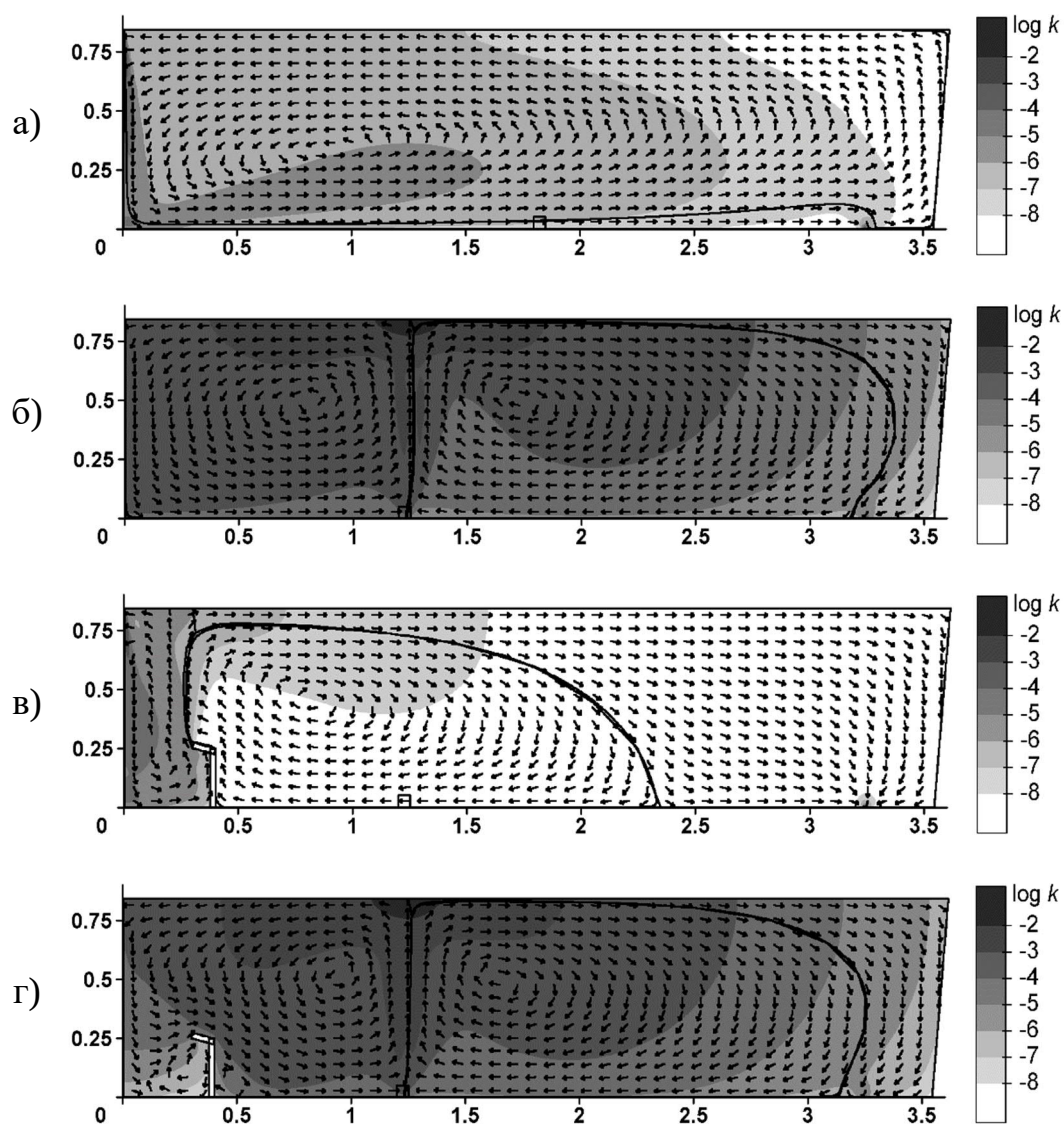


Рисунок 4.21 – Розподіл турбулентної кінетичної енергії в двострумковому проміжному ковші без донного уступу зі зниженим рівнем розплаву (серія З): а – «порожній» промковш; б – те ж, з продувкою; в – вставка типу «турбостоп»; г – те ж, з продувкою, відповідно.

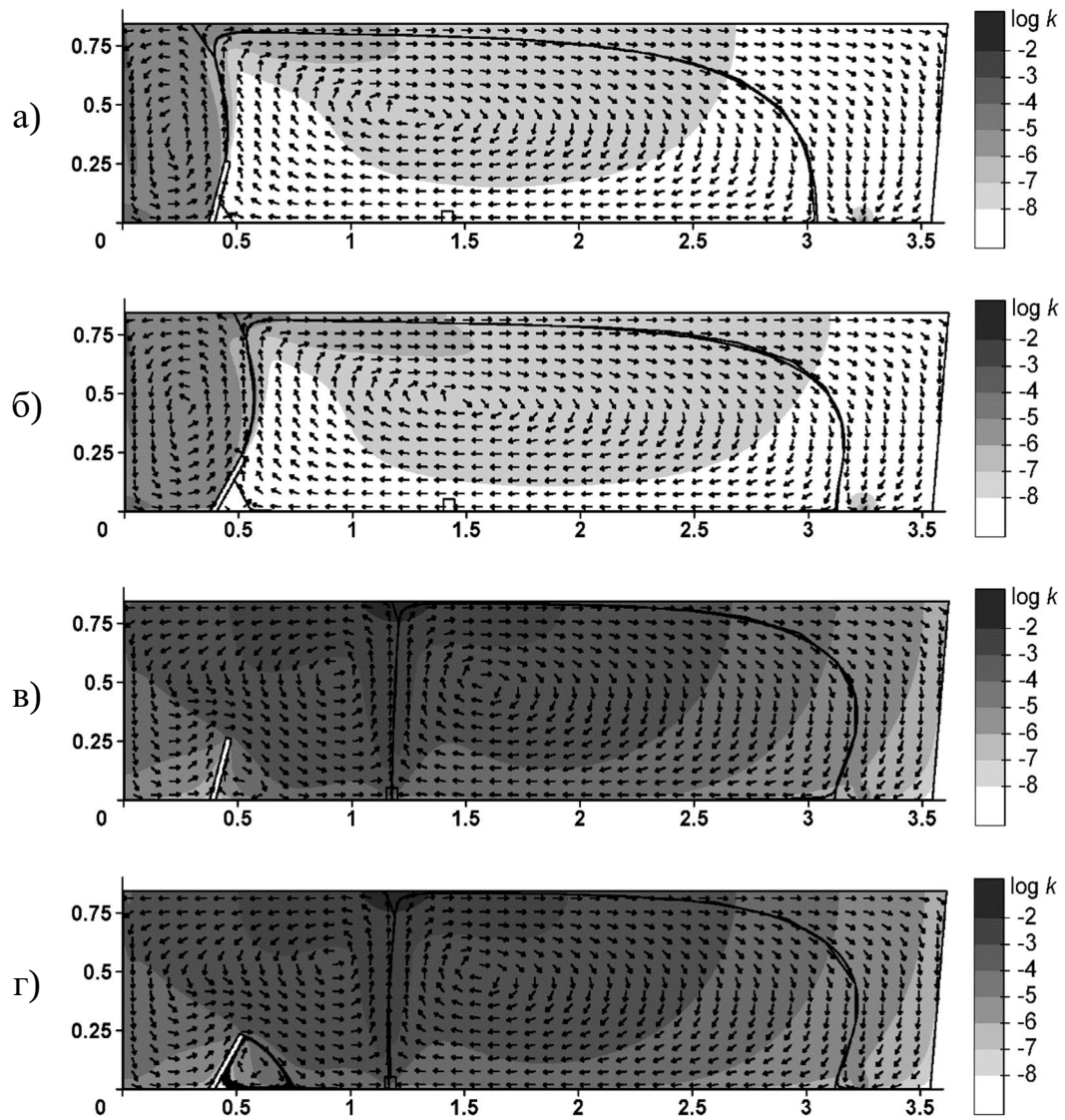


Рисунок 4.22 – Розподіл турбулентної кінетичної енергії в двострумковому проміжному ковші з плоским дном і зниженим рівнем розплаву (серія 4): а – з вставкою з нахилом граней відносно вертикального поперечного перетину в 15° ; б – з вставкою з нахилом в 30° ; в, г – те ж саме, але з продувкою.

Таблиця 4.1

Середня кінетична енергія
і турбулентна кінетична енергія по зонах (серія 1)

Продувка	—	6 м³/час	—	6 м³/час
Вставка	—		“турбостоп”	
Зона 1				
Площа S, м²	1.802695	0.945	0.256654	0.889542
K, (Дж/кг)×м²	0.013385	0.057326	0.004146	0.022068
K _т , (Дж/кг)×м²	0.008317	0.059685	0.003197	0.050404
K/S, Дж/кг	0.007425	0.060662	0.016154	0.024808
K _т /S, Дж/кг	0.004614	0.063159	0.012456	0.056663
Зона 2				
Площадь S, м²	1.057137	1.936813	1.535951	1.917437
K, (Дж/кг)×м²	0.0004362	0.016965	0.000524	0.022063
K _т , (Дж/кг)×м²	0.0004164	0.042668	0.00102	0.055943
K/S, Дж/кг	0.0004127	0.008759	0.0003412	0.011507
K _т /S, Дж/кг	0.0003939	0.02203	0.0006641	0.029176
Зона 3				
Площа S, м²	0.468554	0.446573	1.527511	0.513136
K, (Дж/кг)×м²	0.0003807	0.001695	0.0003399	0.00181
K _т , (Дж/кг)×м²	0.0004015	0.004848	0.0005317	0.006078
K/S, Дж/кг	0.0008126	0.003796	0.0002225	0.003527
K _т /S, Дж/кг	0.000857	0.010856	0.0003481	0.011845
Весь проміжний ківш				
Площа S, м²	3.328386	3.328386	3.320115	3.320115
K, (Дж/кг)×м²	0.014201	0.075986	0.00501	0.045942
K _т , (Дж/кг)×м²	0.00865	0.109373	0.004701	0.112048
K/S, Дж/кг	0.004267	0.02283	0.001509	0.013837
K _т /S, Дж/кг	0.002599	0.032861	0.001416	0.033748

Таблиця 4.2

Середня кінетична енергія
і турбулентна кінетична енергія по зонах (серія 2)

Продувка	—		6 м ³ /час	
Вставка	15°	30°	15°	30°
Зона 1				
Площа S, м ²	0.359204	0.437752	0.854106	0.824679
K, (Дж/кг)×м ²	0.010125	0.012669	0.015641	0.013215
K _т , (Дж/кг)×м ²	0.003967	0.003862	0.0435	0.038025
K/S, Дж/кг	0.028187	0.02894	0.018312	0.016024
K _т /S, Дж/кг	0.011044	0.008822	0.050931	0.046109
Зона 2				
Площа S, м ²	2.210041	2.283624	1.991086	2.009119
K, (Дж/кг)×м ²	0.001525	0.001746	0.028537	0.033475
K _т , (Дж/кг)×м ²	0.001967	0.00217	0.064861	0.072167
K/S, Дж/кг	0.0006898	0.0007646	0.014332	0.016661
K _т /S, Дж/кг	0.00089	0.0009502	0.032576	0.03592
Зона 3				
Площа S, м ²	0.752349	0.600315	0.476403	0.487893
K, (Дж/кг)×м ²	0.0008005	0.0008115	0.001282	0.001364
K _т , (Дж/кг)×м ²	0.0006319	0.000569	0.005975	0.006009
K/S, Дж/кг	0.001064	0.001352	0.00269	0.002795
K _т /S, Дж/кг	0.0008399	0.0009479	0.012542	0.012316
Весь проміжний ківш				
Площа S, м ²	3.321594	3.321691	3.321594	3.321691
K, (Дж/кг)×м ²	0.01245	0.015226	0.045459	0.048053
K _т , (Дж/кг)×м ²	0.006566	0.006601	0.114336	0.116201
K/S, Дж/кг	0.003748	0.004584	0.013686	0.014466
K _т /S, Дж/кг	0.001977	0.001987	0.034422	0.034983

Таблиця 4.3

Середня кінетична енергія
і турбулентна кінетична енергія по зонах (серія 3)

Продувка	—	6 м³/час	—	6 м³/час
Вставка	—		“турбостоп”	
Зона 1				
Площа S, м²	0.149996	1.068456	0.259206	1.058519
K, (Дж/кг)×м²	0.001525	0.036862	0.001717	0.021207
K _т , (Дж/кг)×м²	0.0002393	0.039843	0.001359	0.038515
K/S, Дж/кг	0.010167	0.0345	0.006624	0.020035
K _т /S, Дж/кг	0.001595	0.03729	0.005243	0.036386
Зона 2				
Площа S, м²	2.897769	1.655773	1.300263	1.55478
K, (Дж/кг)×м²	0.005039	0.023457	0.0001991	0.019779
K _т , (Дж/кг)×м²	0.004073	0.034797	0.0004056	0.037419
K/S, Дж/кг	0.001739	0.014167	0.0001531	0.012721
K _т /S, Дж/кг	0.001406	0.021016	0.000312	0.024067
Зона 3				
Площа S, м²	—	0.323535	1.480026	0.426197
K, (Дж/кг)×м²	—	0.00133	0.0001317	0.000943
K _т , (Дж/кг)×м²	—	0.003054	0.0002293	0.003584
K/S, Дж/кг	—	0.004109	0.000089	0.002213
K _т /S, Дж/кг	—	0.00944	0.000155	0.008409
Весь проміжний ківш				
Площа S, м²	3.047765	3.047765	3.039495	3.039495
K, (Дж/кг)×м²	0.006564	0.061648	0.002048	0.041929
K _т , (Дж/кг)×м²	0.004312	0.077694	0.001994	0.079517
K/S, Дж/кг	0.002154	0.020227	0.0006738	0.013795
K _т /S, Дж/кг	0.001415	0.025492	0.000656	0.026161

Таблиця 4.4

Середня кінетична енергія
і турбулентна кінетична енергія по зонах (серія 4)

Продувка	—		6 м ³ /час	
Вставка	15°	30°	15°	30°
Зона 1				
Площа S, м ²	0.353018	0.436954	1.001127	0.992315
K, (Дж/кг)×м ²	0.004359	0.00612	0.0154	0.014018
K _т , (Дж/кг)×м ²	0.001681	0.001787	0.035766	0.033704
K/S, Дж/кг	0.012346	0.014006	0.015382	0.014126
K _т /S, Дж/кг	0.004762	0.00409	0.035725	0.033965
Зона 2				
Площа S, м ²	1.899977	2.002169	1.58287	1.599091
K, (Дж/кг)×м ²	0.000723	0.0009775	0.021711	0.023268
K _т , (Дж/кг)×м ²	0.0008292	0.00101	0.040145	0.042275
K/S, Дж/кг	0.0003805	0.0004882	0.013716	0.014551
K _т /S, Дж/кг	0.0004364	0.0005045	0.025362	0.026437
Зона 3				
Площа S, м ²	0.787979	0.601948	0.456976	0.449665
K, (Дж/кг)×м ²	0.0003142	0.0003463	0.000868	0.000802
K _т , (Дж/кг)×м ²	0.00028	0.0002525	0.003725	0.003848
K/S, Дж/кг	0.0003988	0.0005753	0.001899	0.001784
K _т /S, Дж/кг	0.0003553	0.0004194	0.008151	0.008558
Весь проміжний ківш				
Площа S, м ²	3.040974	3.041071	3.040974	3.041071
K, (Дж/кг)×м ²	0.005398	0.007444	0.037979	0.038088
K _т , (Дж/кг)×м ²	0.00279	0.00305	0.079635	0.079827
K/S, Дж/кг	0.001775	0.002448	0.012489	0.012525
K _т /S, Дж/кг	0.0009175	0.001003	0.026187	0.02625

Виконаний подібним чином аналіз розрахунків, відповідно до моделі, отриманої в даних дослідженнях, показує (таблиця 4.1, таблиця 4.2), що для випадку днища з уступом застосування порогів/металоприймача в центральній частині промковша (рис. 4.7 в, г) призводить до зниження турбулізації всього металу в об'ємі на 7–16%, застосування продувки в поперечному перерізі промковша (рис. 4.9) підвищує турбулізацію на 29–33 %.

У разі наявної продувки область інтенсивного турбулентного руху зосереджена в околі спливаючої газо-рідинної течії (рис. 4.7 б, г). Додаткове застосування порогів при цьому не має помітного впливу на співвідношення об'ємів виділених зон, але призводить до гальмуючого ефекту, знижуючи швидкості руху розплаву в середньому на 20 %, а в зоні спливання включень на 15–30% і дає зворотний ефект посилення на 10–40 % (в залежності від геометрії) турбулізації розплаву, що знаходиться на периферії за продувним блоком.

Використовуючи подібний підхід можна виявити якісні та кількісні особливості досліджуваних гідро-газодинамічних потоків, що впливають на час перебування розплаву в зонах і на інтенсивність процесів що відбуваються в них.

Таблиця 4.5 є узагальнюючою для серій розрахунків 1–4. На ній можна прослідити трансформацію виділених зон, як вони змінюються в залежності від нахилу кута перегородки та наявності продувки.

Інформація про кінетичну енергію дозволяє визначити локальні значення швидкостей розплаву по окремих зонах (таблиця 4.6). Є можливість оцінити як величини швидкості осередненого руху розплаву, що має вклад у циркуляційні процеси, так і пульсаційну складову турбулентного руху розплаву, середнє за часом значення якої нульове, але яка, згідно результату аналізу в розділі 3 повинна впливати на рух дрібних фракцій неметалічних включень.

Таблиця 4.5

Співвідношення розмірів зон, а також кінетичної енергії
і турбулентної кінетичної енергії потоків в проміжному ковші (серії 1–4)

Варіант	З донним уступом						З плоским дном					
Продувка	—			6 м³/час			—			6 м³/час		
Вставка	—	15°	30°	—	15°	30°	—	15°	30°	—	15°	30°
Зона 1												
S_1/S	0,54	0,11	0,13	0,28	0,26	0,25	0,05	0,12	0,14	0,35	0,33	0,33
K_T/K	0,62	0,39	0,30	1,04	2,78	2,88	0,16	0,39	0,29	1,08	2,32	2,40
$K/(K_T+K)$	0,62	0,72	0,77	0,49	0,26	0,26	0,86	0,72	0,77	0,48	0,30	0,29
$K_T/(K_T+K)$	0,38	0,28	0,23	0,51	0,74	0,74	0,14	0,28	0,23	0,52	0,70	0,71
Зона 2												
S_2/S	0,32	0,67	0,69	0,58	0,60	0,60	0,95	0,62	0,66	0,54	0,52	0,53
K_T/K	0,95	1,29	1,24	2,52	2,27	2,16	0,81	1,15	1,03	1,48	1,85	1,82
$K/(K_T+K)$	0,51	0,44	0,45	0,28	0,31	0,32	0,55	0,47	0,49	0,40	0,35	0,36
$K_T/(K_T+K)$	0,49	0,56	0,55	0,72	0,69	0,68	0,45	0,53	0,51	0,60	0,65	0,64
Зона 3												
S_3/S	0,14	0,23	0,18	0,13	0,14	0,15	—	0,26	0,20	0,11	0,15	0,15
K_T/K	1,05	0,79	0,70	2,86	4,66	4,41	—	0,89	0,73	2,30	4,29	4,80
$K/(K_T+K)$	0,49	0,56	0,59	0,26	0,18	0,18	—	0,53	0,58	0,30	0,19	0,17
$K_T/(K_T+K)$	0,51	0,44	0,41	0,74	0,82	0,82	—	0,47	0,42	0,70	0,81	0,83
Разом												
K_T/K	0,61	0,53	0,43	1,44	2,52	2,42	0,66	0,52	0,41	1,26	2,10	2,10
$K/(K_T+K)$	0,62	0,65	0,70	0,41	0,28	0,29	0,60	0,66	0,71	0,44	0,32	0,32
$K_T/(K_T+K)$	0,38	0,35	0,30	0,59	0,72	0,71	0,40	0,34	0,29	0,56	0,68	0,68

Є можливість також оцінити відношення пульсаційної швидкості до швидкості осередненого руху і побачити, в яких саме зонах домінує турбулентний перенос ($u'/U_{\text{сер}} > 1$) і за яких умов конфігурації та продувки. У таблиці 4.6 сірим кольором виділені комірки, що відповідають найбільшій інтенсифікації турбулентних процесів серед розглянутих комбінацій параметрів донної вставки та режимів продувки. Як видно, вони відповідають діапазону кутів розкриття бічних стінок вставки 15° – 30° при наявній продувці.

Таблиця 4.6

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 м³/час			—			6 м³/час		
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 4.23 зображені порівняльні графіки відношення швидкості пульсацій до середньої швидкості руху розплаву в об'ємі промковша в залежності від конфігурації і наявності продувки для таблиці 4.6.

Проведене моделювання зниженого рівня розплаву для відповідних досліджуваних конфігурацій і режимів продувки (рис. 4.24 та 4.25) не виявило суттєвих змін в структурі потоків, хоча обмежений рівень розплаву є формуючим фактором для вихрових зон у порожнині промковша, який обмежує їх поширення вздовж конструкції проміжного пристрою. На рисунку 4.25 можна помітити розширені спокійні зони з відсутньою циркуляцією в просторі над розливними стаканами там, де в умовах

номінального рівня розплаву відбивається витіснення потоків циркуляційними зонами до торцевих стінок. Розподіл турбулентної кінетичної енергії в двострумковому 43-тонному проміжному ковші зі зниженим рівнем розплаву типової конструкції показано на рисунку 4.24.

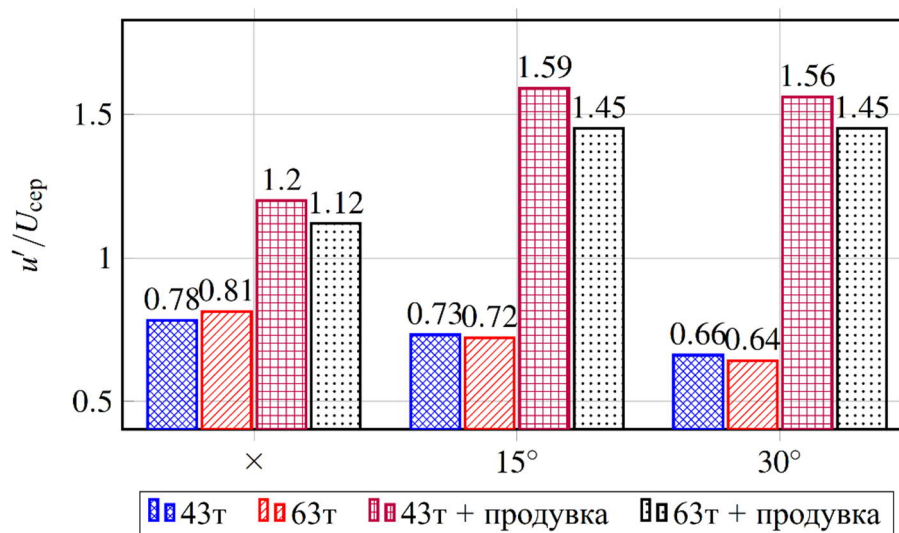


Рисунок 4.23 – Відношення швидкості пульсацій до середньої швидкості руху розплаву в об'ємі промковша в залежності від конфігурації і наявності продувки.

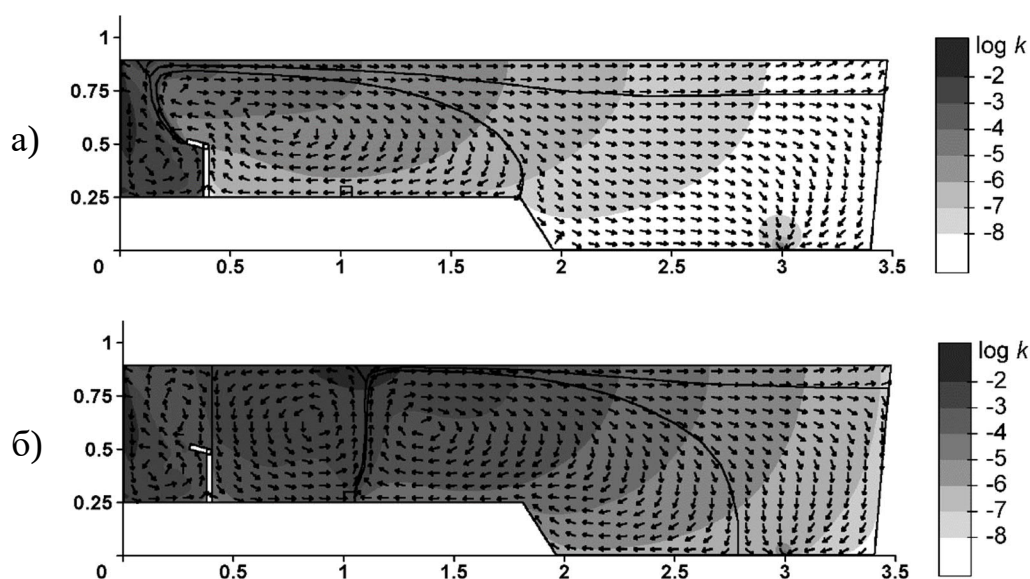


Рисунок 4.24 – Розподіл турбулентної кінетичної енергії в двострумковому проміжному ковші зі зниженим рівнем розплаву: а – з вставкою типу «турбостоп»; б – те ж саме, але з продувкою.

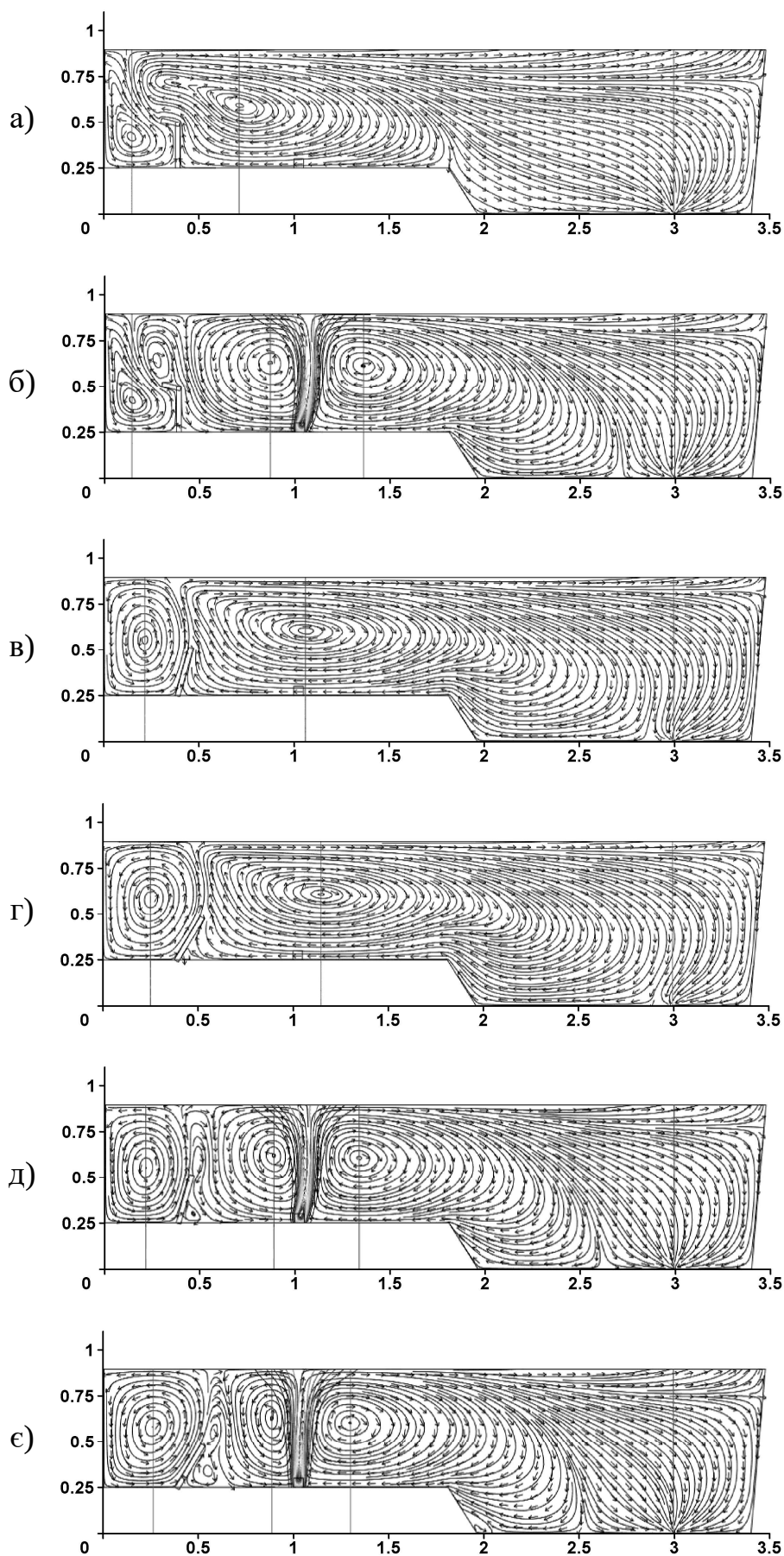


Рисунок 4.25 – Структура течій при заниженому рівні розплаву без та з продувкою: а, б – вставка типу «турбостоп» ; в–е – похилі вставки 15° , 30°

У первісно регулярних потоках в результаті нестійкості виникають випадкові збурення, які швидко ростуть, взаємодіють з основним потоком і одне з одним, породжують нові збурення, тобто потоки стають турбулентними. Існує два основних чинники нестійкості гідродинамічних потоків: просторовий зсув швидкості (зміна швидкості поперек потоку) та термічна нестійкість в рідині, що просторово неоднорідно розігріта, в полі сили тяжіння.

У першому випадку нестійкість розвивається при достатньо великих числах Рейнольдса. У разі термічної нестійкості розрізняють горизонтально-неоднорідний та вертикально-неоднорідний розігрів. Під горизонталлю розуміється поверхня рівного потенціалу сили тяжіння, а під вертикаллю – напрямом її градієнта. При горизонтально-неоднорідному розігріві рідина завжди знаходиться в рухомому стані, а при вертикальному – якщо вертикальний градієнт температури задовольняє умові

$$\frac{dT}{dz} < \gamma_a = -\alpha g \frac{T}{c_p}, \quad (4.4)$$

де γ_a – адіабатичний градієнт температури, α – коефіцієнт теплового розширення рідини, g – прискорення сили тяжіння, c_p – теплоємність при постійному тиску.

Якщо $\frac{dT}{dz} \geq \gamma_a$ та за відсутності горизонтальних градієнтів температури (і інших збурюючих сил) рідина знаходиться у спокої.

Узагальнююче формулювання умов стійкості середовища в полі сили тяжіння вимагає, щоб

$$\frac{d\rho}{dz} > \left(\frac{d\rho}{dz} \right)_a = -\rho g c^{-2}, \quad (4.5),$$

де ρ – щільність середовища, c – швидкість звуку в ній, $\left(\frac{d\rho}{dz} \right)_a$ – адіабатичний градієнт щільності середовища. Якщо щільність середовища зменшується зі збільшенням висоти швидше, ніж за адіабатичним градієнтом, то в ній

виникають вертикальні рухи певної міри випадкового характеру – так звана конвекція, або термічна турбулентність. В протилежному випадку конвекція відсутня.

Стійка стратифікація за висотою середовища ускладнює розвиток зсувної нестійкості потоку. З рівняння локального балансу турбулентної енергії, що враховує генерацію кінетичної енергії турбулентності та її дисипації, обумовленої в'язкістю, випливає, що турбулентність зсувного походження пригнічується повністю, коли число Річардсона:

$$Ri = \frac{\frac{g}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dz} \right) + \frac{g^2}{c^2}}{\left(\frac{du}{dz} \right)^2} \geq Ri_K \sim 1. \quad (4.6)$$

Число Річардсона Ri – критерій подібності в гідродинаміці, рівний відношенню потенційної енергії тіла, зануреного в рідину до його кінетичної енергії. Під «тілом» в контексті досліджуваних процесів на межі розділу «метал – шлак» слід розуміти рідину. У цьому випадку формула (4.6) може бути переписана у вигляді

$$Ri = \frac{(\rho_m - \rho_{ш})gL}{\rho_m v^2}, \quad (4.7)$$

де ρ_m – щільність рідини; $\rho_{ш}$ – щільність шлаку; g – прискорення вільного падіння; L – характерна довжина вздовж нормалі до поверхні, що розмежує метал та шлак; v – характерна швидкість.

Якщо помножити і розділити (4.7) на L^2/v^2 , то вираз набуде вигляду

$$\frac{(\rho_m - \rho_{ш})gL}{\rho_m v^2} \times \frac{v^2}{v^2 L^2} = \frac{Ar}{Re^2}. \quad (4.8)$$

Якщо число Річардсона менше одиниці – сила Архімеда не відіграє суттєвої ролі для течії. Якщо воно більше одиниці – сила плавучості домінує (в тому сенсі, що конвекція не може ефективно перемішати розшароване по щільності середовище).

Щільність сталі – 7000 кг/м^3 , шлаку – 3000 кг/м^3 , за характерний розмір прийнятий радіус вихору – $0,32 \text{ м}$, середня швидкість циркуляції розплаву – $0,45 \text{ м/с}$.

В'язкість – властивість рідини чинити опір відносному зсуву шарів. Ця властивість проявляється в тому, що в реальній рідині при русі виникають дотичні напруження. У нашому випадку дотичні напруження в напрямку від розплаву до шлаку рівні напруженням від шлаку до розплаву. За даними експериментальних досліджень для розплаву промислових марок сталі значення динамічної в'язкості в інтервалі температур $1480\text{--}1650^\circ\text{C}$ знаходяться в межах $0.007 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Динамічна в'язкість шлаків коливається в широких межах ($0.01\text{--}0.4 \text{ Па}\cdot\text{с}$).

Відповідно до отриманих результатів чисельного моделювання можливо визначити градієнт швидкості поблизу шлаку. Величину L вибираємо з наступних міркувань. Товщина рідкого шару шлаку $\sim 0,01 \text{ м}$. Такий же шар вибираємо і для визначення градієнта швидкості в розплаві, який дорівнює 0.3 1/с . Критерій Річардсона в цьому випадку в період продувки в зоні максимальних приповерхневих швидкостей дорівнює:

$$Ri = 9.03. \quad (4.9)$$

Тож, при визначених за всіма врахованими умовами режимах дії збурюючих факторів на розплав в системі «метал – шлак» сила плавучості домінує і наявні найбільш інтенсивні конвективні потоки достатньо обмежені технологічними умовами продувки та конфігурацією обмежуючих турбулентність елементів, щоб гарантувати відсутність порушення покривного шлаку.

4.4 Перевірка елементів технології видалення неметалічних включень в умовах дослідного виробництва

Найбільш ефективно процес безперервного рафінування в проміжному ковші МБРЗ буде протікати, якщо внаслідок трансформації гідрогазодинамічних течій за допомогою облаштування елемента що відбиває струмінь (металоприймача) та продування інертним газом, коли забезпечується транспортування рідкого металу, збагаченого неметалічними включеннями, в зону контакту «метал – шлак».

Розглянуті механізми видалення неметалічних включень були перевірені [20] в умовах ПАТ МК «Азовсталь» (м. Маріуполь) при безперервному литті слябів зі сталі категорій міцності X60 і X70. Експериментальний варіант проміжного ковша було обладнано дослідною донною фурмою з просторово орієнтованими каналами з [22], що забезпечує бульбашковий режим продувки.

Дослідження проб шлаку, відібраних з роздавальної камери проміжного ковша дослідного струмка протягом розливання серії плавок, показало практично повну відсутність зміни вмісту оксидів FeO і MnO при збільшенні вмісту Al_2O_3 у шлаку. Дані факти свідчать про відсутність впливу запропонованої технології на процеси окиснення металу в ковші, підтверджують оптимальність вибраних параметрів, що забезпечують ефективну гідродинамічну ситуацію в ковші і, в наслідок, ефективність технології рафінування металу від неметалічних включень.

Дослідження характерних неметалічних включень в досліджуваному металі на автоемісійному сканувальному електронному мікроскопі ULTRA 55 з кількісною оцінкою їх хімічного складу на спектрометрі енергетичної дисперсії INKA PentaFETx3 показало, що основною складовою включень є складні оксиди на основі Al_2O_3 . Склад включень представлений в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Результати хімічного аналізу характерних зон
(спектри) неметалічних включень

Спектр		Вміст елементів, % маси					
		O	Al	Ca	S	Mg	інші
1	а	37.6	26.0	30.3	1.7	2.2	2.2
	б	38.4	28.9	27.3	3.1		2.3
2	а	1.8		54.6	40.9		2.7
	б	9.6	7.9	48.2	30.9	0.4	3.0

Порівняльний аналіз ефективності комплексної технології рафінування проводився за наступними параметрами:

- зміна складу покривного шлаку в проміжному ковші протягом кампанії ковша;
- зміна забрудненості рідкого металу протягом кампанії проміжного ковша за типами включень (по пробам з кристалізатора);
- зміна ступеня рафінування металу протягом кампанії проміжного ковша за типами включень;
- забрудненість литого металу неметалічними включеннями по товщині заготовки за типами включень і розмірним групам (проби від литого слябу).

Порівняння забрудненості дослідного і порівняльного металу включеннями різного типу проведено шляхом оцінки зразків методом індексів (метод "Л" по ГОСТ 1778) при збільшенні на мікроскопі «Неофот-2» у чотири рази по пробам рідкого металу з приймальної секції проміжного ковша і обох кристалізаторів.

Проведено порівняльний аналіз рафінування металу від різних неметалічних включень шляхом порівняння індексів рафінування:

$$I_{\text{раф.}} = \frac{I_{\text{ПК}} - I_{\text{кр.}}}{I_{\text{ПК}}}, \quad (4.10)$$

де $I_{\text{раф.}}$ – індекс рафінування металу або рафінування від включення певного типу; $I_{\text{ПК}}, I_{\text{кр.}}$ – загальний індекс забрудненості металу або індекс забрудненості металу включеннями певного типу по пробам, що відібрані з проміжного ковша і кристалізатора, відповідно.

Діапазони індексів забрудненості металу різними типами включень наведені в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8

Діапазони індексів забрудненості дослідного і порівняльного металу
за типами включень

Тип включень	Індекс забрудненості, $I \times 10^{-3}$	
	Порівняльний метал	Дослідний метал
Силікати	0.23 – 1.48	0.01 – 0.44
Сульфіди	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

За результатами проведених досліджень забрудненості безперервнолитих слябів слід зазначити високу ступінь ефективності розробленої технології, що підтверджується наступним:

- 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.

Варто зазначити, що збільшення відсотка залишкових неметалічних включень дрібних фракцій очікуване і підтверджує отримані у [18] висновки щодо несуттєвого впливу динамічних сил на рух, транспортування та глибоке проникнення у шлак таких зважених у розплаві неметалічних включень невеликих розмірів.

На основі отриманих результатів дослідження металу дослідно-промислових плавок можна стверджувати, що розроблена комплексна технологія рафінування металу в проміжному ковші, яка забезпечує видалення неметалічних включень з використанням донної продувки в бульбашковому режимі через спеціальну фурму з просторово орієнтованими каналами, є високоефективною і дозволяє отримувати сталь зі зниженим вмістом неметалічних включень.

Висновки до четвертого розділу

Інформація про кінетичну енергію та енергію турбулентного руху в розплаві дає можливість визначати режими дії на розплав, що забезпечують максимальну ефективність його взаємодії з шлаковим покриттям з метою видалення неметалічних включень, запобігання порушення динамічної рівноваги стратифікованих шарів рідини на межі контакту «метал – шлак» з потенційно негативним для промковша затягуванням шлаку в розплав, а також запобігання виникнення застійних зон, що мають негативний вплив на тепловий стан і гомогенність параметрів розплаву в проміжному ковші, особливо в перехідних режимах.

Інформація, отримана у роботі з проведених на фізичних моделях досліджень умов формування бульбашкового режиму спливання газорідинних струменів дає можливість встановити всі необхідні конструктивні і

режимні параметри для розробки спеціальної конструкції фурми і режимів продувки сталі аргоном при її рафінуванні в проміжному ковші в процесі розливання на МБРЗ. Бульбашковий режим продувки досягається при наступній конфігурації продувного блока: асиметричне розташування отворів з просторовим чергуванням напрямку відхилення від вертикальної осі в протилежних напрямках при взаємній відстані не менше $(20-40) \cdot d_0/2$ між сусідніми отворами.

На підставі результатів математичного і фізичного моделювання розроблена вдосконалена технологія з наступними оптимізованими параметрами:

- проміжний ківш облаштовується донними фурмами у вигляді поперечних продувних блоків, які забезпечують бульбашковий режим продувки аргоном по всьому поперечному перетину промковша на шляху від точки падіння затопленого струменя з сталюковша до стаканів кристалізаторів;
- оптимальне віддалення продувних блоків від центральної осі та струменя з сталюковша, 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 6–7 м³/год на один продувний блок;
- для підтримки інтенсивності конвективних циркуляційних течій розплаву по всьому об'єму промковша без утворення застійних зон або зон з надто повільними процесами при одночасному зменшенні придонної турбулізації та пригніченні потенційно можливих короткозамкнених течій до кристалізаторів зона падіння струменя зі сталюковша незалежно від наявності і дії продувки обмежується

вбудованим обмежувальним елементом з кутом розкриття торцевих стінок в діапазонні $2 \times (15^\circ - 30^\circ)$ відносно вертикальної осі.

Складові технології перевірені в умовах ПАТ МК «Азовсталь» (м. Маріуполь) при безперервному литті слябів зі сталі категорій міцності Х60 і Х70 на експериментальному варіанту проміжного ковша, обладнаному 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.

На основі з отриманих результатів дослідження металу дослідно-промислових плавок можна стверджувати, що розроблена комплексна технологія рафінування металу в проміжному ковші, яка забезпечує видалення неметалічних включень з використанням донної продувки в бульбашковому режимі через спеціальну фурму з просторово орієнтованими каналами, є високоефективною і дозволяє отримувати сталь зі зниженим вмістом неметалічних включень.

З метою збільшення точності запропоновану модель процесів можна доповнити рівнянням для розрахунку щільності газової фази на основі рівняння стану ідеального газу та розрахунками об'ємної кількості та процесу подрібнення спливаючих бульбашок, що дозволить робити точніші оцінки швидкості спливання бульбашок і їх впливу на гідродинамічні параметри течії.

ЗАГАЛЬНІ 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 металевому розплаві поставлена математична модель гідродинамічних та тепломасообмінних процесів в проміжному ковші, що дозволяє аналізувати процес обробки розплаву із застосуванням продувки аргоном. Модель заснована на системі рівнянь у наближенні Буссінеска та $k-\varepsilon$ моделі турбулентності і включає рівняння Нав'є-Стокса, рівняння 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 промковш 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. Критерій 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 наявної комбінації розглянутих факторів (інтенсивність циркуляції розплаву, його ступеня турбулізації та інтенсивності бульбашкової продувки).

3. Уперше для проміжного ковша запропоновано метод якісного аналізу структури потоків розплаву за допомогою виявлення характерних зон течії розплаву по контурах ізоліній (або ізоповерхонь), що проходять на межах розділу циркуляційних і прямих течій, одержуваних за інформацією з чисельного моделювання, 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 і вигідно відрізняється від підходів, що використовують ситуативний спосіб виокремлення зон в об'ємі металургійного агрегату (на основі комірок ідеального змішування та витіснення), можливістю аналізу складних просторово-розвинених процесів у випадках, коли неможливо визначити розмежування зон звичним способом. Завдяки універсальним простим принципам запропонований метод 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 забрудненість металу неметалічними включеннями в процесі

перехідних режимів, коли не сформовані стабілізовані циркуляційні потоки, що відповідає 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kaushik P., Lehmann J., Nadif M. State of the Art in Control of Inclusions, Their Characterization, and Future Requirements // Metallurgical and Materials Transactions B. 2012. Vol. 43, No. 4. P. 710–725.
2. Камкина Л. В., Безшкуренко А. Г., Камкин В. Ю., Пройдак С. В. Раскисление стали и проблема удаления неметаллических включений // Сучасні проблеми металургії : наук. вісті. Ключові аспекти розвитку електрометалургійної галузі. Дніпропетровськ, 2016. Т. 19, Вип. 1. С. 176–185. URL: <http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/handle/123456789/4803>
3. Yogeshwar Sahai, Toshihiko Emi. Tundish Technology for Clean Steel Production. World Scientific, 2008. 316 p. ISBN: 9789812706218.
4. Вдовин К. Н., Семенов М. В., Точилкин В. В. Рафинирование стали в промежуточном ковше МНЛЗ: Монография. Магнитогорск : ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. 118 с.
5. Drofelnik N., Lamut J., Marolt M., Knap M. Interaction Between Steel Melt and Refractory Materials in Tundish // Archives of Metallurgy and Materials. 2015. Vol. 60, No. 1. P. 269–273.
6. Shihong Liu, Mei Liang, Shizhen Niu et al. Unsteady State and Inclusion Control during Steel Continuous Casting // 2006 AISTech Conference Proceedings. 2006. P. 915–927.
7. Marx K., Koitzsch R., Rodl S. Investigations on inclusion agglomeration and separation in a continuous slab casting tundish applying new numerical simulation approaches // 6th European Continuous Casting Conference Proceedings. Riccione, Italy, 2008.
8. Ho Chi Anh. Modellierung der Partikelagglomeration im Rahmen des Euler–Lagrange–Verfahrens und Anwendung zur Berechnung der Staubabscheidung im

Zyklon : Dissertation / Chi Anh Ho ; Martin–Luther–Universit at Halle–Wittenberg. Halle (Saale), 2004. 158 S. URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:3-000006169>

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

10. **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.

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. **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.

13. **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.

14. 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>

15. 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>
16. **Комаров В. Ф.**, Недопекин Ф. В., Белоусов В. В. Численное моделирование гидродинамики в промежуточном ковше МНЛЗ в переменных вихрь-функция тока // Metallurgicheskaya teplo tekhnika. Sbornik nauchnykh trudov Natsionalnoy metallurgicheskoy akademii Ukrainy. Dnepropetrovsk : HmetAU, 2003. T. 9. С. 70–77.
17. **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.
18. 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>
19. 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.
20. 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>

21. 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>
22. 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>
23. 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.
24. 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.
25. Процессы непрерывной разливки / А. Н. Смирнов, В. Л. Пилюшенко, А. А. Минаев и др. Донецк : ДонНТУ, 2002. 535 с. ISBN: 9667917061.
26. Лякишев Н. П., Шалимов А. Г. Развитие технологии непрерывной разливки стали. М. : ЭЛИЗ, 2002. 208 с. ISBN: 5901179056.
27. Warzecha P., Hutny A. M., Warzecha M., Merder T. Optimization of Steel Flow in the Tundish by Modifying its Working Area // Archives of Metallurgy and Materials. 2016. Vol. 61, No. 4. P. 2071–2077.
28. Nakashima Junji, Toh Takehiko. Improvement of Continuously Cast Slabs by Decreasing Nonmetallic Inclusions // NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT

No. 104. AUGUST 2013. P. 42–47. URL: <http://www.nssmc.com/en/tech/report/nsc/pdf/104-08.pdf>

29. Ефимов В. А., Ефимов Г. В., Дюк Е. Ф. и др. Вторичное окисление и рафинирование при непрерывной разливке стали // Процессы литья. 1999. № 4. С. 28–36.

30. Непрерывная разливка стали: учеб. пособие для студ. металлург. спец. вузов / А. П. Огурцов, А. Г. Величко, Е. И. Исаев, А. В. Гресс. Днепродзержинск : ДГТУ, 1999. 306 с. ISBN: 5776386047.

31. Ткачев П. Н., Попова Т. Н., Анюхин М. Н., Гонтарук Е. И. Влияние шлака промежуточного ковша на загрязненность неметаллическими включениями // Черная металлургия России и стран СНГ в XXI веке (III международная конференция). Т. 3. М. : Металлургия, 1994. С. 119–120.

32. Кан Ю. Е. Развитие непрерывной разливки стали в России и СНГ // Черная металлургия России и стран СНГ в XXI веке (III международная конференция). Т. 3. М. : Металлургия, 1994. С. 108–110.

33. Nuri T., Umesawa K., Ohashi T. et al. Metallurgical Effects of complete Scaling and Gas Bubbling of molten steel in the tundish // Transaction of ISIJ. Vol. 24, No. 1. P. 8–16.

34. Mancini J., van der Stel J. Tundish metallurgy: a combined Irsid and Hoogovens research // Revue de Métallurgie. 1992. Vol. 89, No. 3. P. 269–278.

35. McLean A. The turbulent tundish – Contaminator or refiner? // 71st Steelmaking Conference Proceedings: Volume 71, Toronto Meeting, April 17–20, 1988. Warrendale, PA : I&S Society AIME, 1988. P. 3–23.

36. Zhang Lifeng, Thomas Brian G. Fluid flow and inclusion motion in the continuous casting strand // XXIV Steelmaking National Symposium, Morelia, Mich, Mexico, 26–28, Nov. 2003. P. 184–196.

37. Cloete J. H., Akdogan G., Bradshaw S. M., Chibwe D. K. Physical and numerical modelling of a four-strand steelmaking tundish using flow analysis of

- different configurations // J. S. Afr. Inst. Min. Metall. 2015. Vol. 115, No. 5. P. 355–362. URL: <http://www.scielo.org.za/pdf/jsaimm/v115n5/08.pdf>
38. Pieprzyca J., Kudlinski Z., Merder T. Effect of Temperature Fields Heterogeneity in the Tundish on Primary Structure of Continuously Cast Ingots // Archives of Metallurgy and Materials. 2015. Vol. 60, No. 1. P. 227–233.
39. Cwudziński A. Mathematical Modeling and Industrial Experiment of Liquid Steel Flow in the Three Outlets Continuous Casting Bloom Tundish // Archives of Metallurgy and Materials. 2013. Vol. 58, No. 4. P. 1077–1083.
40. Hou Q. F., Wang H. Y., Yue Q. et al. Physical and mathematical modelling of swirling flow tundish // Fifth International Conference on CFD in the Process Industries. CSIRO, Melbourne, Australia, 2006.
41. Merder T. The Influence of the Shape of Turbulence Inhibitors on the Hydrodynamic Conditions Occuring in a Tundish // Archives of Metallurgy and Materials. 2013. Vol. 58, No. 4. P. 1111–1117.
42. Sowa L., Bokota A. Numerical Simulation of the Molten Steel Flow in the Tundish of CSC Machine // Archives of Metallurgy and Materials. 2012. Vol. 57, No. 4. P. 1163–1169.
43. Cwudziński A. Numerical Prediction of Hydrodynamic Conditions in one Strand Tundish. Influence of Thermal Conditions and Casting Speed // Archives of Metallurgy and Materials. 2014. Vol. 59, No. 4. P. 1249–1256.
44. Cwudziński A. PIV Method and Numerical Computation for Prediction of Liquid Steel Flow Structure in Tundish // Archives of Metallurgy and Materials. 2015. Vol. 60, No. 1. P. 11–17.
45. Merder T. Numerical Investigation of the Hydrodynamic Conditions in A Multi-Strand CC Tundish with Closed Outlets // Archives of Metallurgy and Materials. 2014. Vol. 59, No. 3.

46. Koria C., Sarbjit Singh. Physical Modeling of the Effects of the Flow Modifier on the Dynamics of Molten Steel Flowing in a Tundish. // ISIJ International. 1994. Vol. 34, No. 10. P. 784–793.
47. Петровский В. А., Волков А. Е., Борисов В. Т. Образование неметаллических включений переменного состава в затвердевающей стали // ИЗВЕСТИЯ высших учебных заведений. Черная металлургия. 1981. Т. 24, № 4. С. 49–52.
48. Zhang Lifeng, Thomas Brian G. Inclusions in continuous casting of steel // XXIV Steelmaking National Symposium, Morelia, Mich, Mexico, 26-28, Nov. 2003. P. 138–183.
49. Моисеева Л. А., Моисеев Б. П. Особенности состава и структуры экзогенных включений в стали и причины их образования // Сталь. 2007. № 7. С. 22–28.
50. Hongbin Yin, Hiroyuki Shibata, Toshihiko Emi, Mikio Suzuki. "In-situ" Observation of Collision, Agglomeration and Cluster Formation of Alumina Inclusion Particles on Steel Melts // ISIJ International. 1997. Vol. 37, No. 10. P. 936–945.
51. Ларионов А. А., Шебаниц Э. Н., Климанчук В. В. и др. Совершенствование технологии комплексного раскисления конвертерной стали кремнием, марганцем и алюминием / // Металл и литье Украины. 2012. № 2–3. С. 23–27. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/116007>
52. Дерябин А. А., Могильный В. В. Повышение эффективности удаления оксидных включений из рельсовой стали в промежуточном ковше // Сталь. 2010. № 5. С. 54–60.
53. Романков П. Г., Фролов В. Ф. Массообменные процессы химической технологии. М. : Высшая школа, 1990. 129 с.
54. Романков П. Г., Курочкина М. И. Экстрагирование из твердых материалов. Л. : Химия, 1983. 364 с.

55. Аксельруд Г. А., Лысянский В. М. Экстрагирование. Система твердое тело – жидкость. Л. : Химия, 1974. 247 с.
56. Krutzer L.L.M. Bert. The influence of flow type, particle type and gravity on orthokinetic coagulation. 1993.
57. Кньюппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. М. : Metallurgia, 1984. 414 с.
58. Трейси Б. М., Эванс Дж. У. Удаление неметаллических включений из стали // Инжекционная металлургия'83. Труды конференции SCANINJECT III, 3rd International Conference on Refining of Iron and Steel by Powder Injection, Luleå, Sweden, June 15–17, 1983. М. : Metallurgia, 1986. С. 239–247.
59. Sinha A. K., Vassilicos A. Physical Modeling Study of Effect of a Turbulence Suppressor Device on Flow and Mixing in a Dual Strand Tundish // 84th Steelmaking Conference Proceedings: Volume 84, Baltimore, Maryland, March 25–28, 2001. Baltimore, MD : I&S Society AIME, 2001. P. 111–125.
60. Zhang Lifeng, Taniguchi Shoji, Cai Kaike. Fluid flow and inclusion removal in continuous casting tundish // Metallurgical and Materials Transactions B. 2000. Vol. 31, No. 2. P. 253–266.
61. Zhang Lifeng, Pluschkell W. Nucleation and growth kinetics of inclusions during liquid steel deoxidation // Ironmaking & Steelmaking. 2003. Vol. 30, No. 2. P. 106–110.
62. Явойский В. И., Рубенчик Ю. И., Оженко А. П. Неметаллические включения и свойства стали. М. : Metallurgia, 1980. 176 с.
63. Saffman P. G., Turner J. S. On the collision of drops in turbulent clouds // Journal of Fluid Mechanics. 1956. Vol. 1, No. 01. P. 16.
64. Бердников В. И., Гудим Ю. А., Картелева М. И. Обобщенная формула для расчета скорости движения твердых частиц, пузырей и капель в жидких и газообразных средах // ИЗВЕСТИЯ высших учебных заведений. Черная металлургия. 1997. Т. 40, № 7. С. 6–10.

65. Еланский Г. Н. Строение и свойства металлических расплавов : [Учеб. пособие для металлург. спец. вузов]. М. : Металлургия, 1991. 160 с. ISBN: 5229007230.
66. Вюнненберг К., Фёрстер К. Изучение характера потоков металла в промежуточном ковше МНЛЗ // Черные металлы. 1984. № 12. С. 8–13.
67. Банненберг Н. Технология внепечной обработки и непрерывного литья при производстве чистой стали // Черная металлургия России и стран СНГ в XXI веке (III международная конференция). Т. 3. М. : Металлургия, 1994. С. 120–129.
68. Охотский В. Б. Флотация неметаллических включений // ИЗВЕСТИЯ высших учебных заведений. Черная металлургия. 1987. Т. 30, № 2. С. 13–15.
69. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Современные технологии разливки и кристаллизации сплавов. М. : Машиностроение, 1998. 360 с. ISBN: 5217029013.
70. Bolger D., Saylor K. Development of a Turbulence inhibiting Pad – Flow Control Device for the Tundish // 77th Steelmaking Conference Proceedings: Volume 77, Chicago Meeting, March 20–23, 1994. Chicago, IL : I&S Society AIME, 1994. P. 225–233.
71. Обработка металла инертными газами / Г. Н. Ойкс, А. В. Степанов, П. И. Мелихов и др. М. : Металлургия, 1969. 112 с.
72. Баканов К. П., Бармотин И. П., Власов Н. Н. Рафинирование стали инертным газом / Под ред. А. Ф. Каблуковского. М. : Металлургия, 1975. 229 с.
73. Кузнецов Ю. М. Способ интенсификации перемешивания металла в ковше при продувке газом // Металлургическая и горнорудная промышленность. 1999. № 12. С. 17–19.
74. Кузнецов Ю. М., Чуваев С. И. Перемешивание металла в ковше при продувке нейтральным газом // Сталь. 1982. № 5. С. 35–36.

75. Живченко В. С., Фролова С. А. Моделирование турбулентных потоков в барботируемом ковше // Сталь. 2010. № 7. С. 22–28.
76. Kang Y. J., Yu L., Sichen Du. Study of inclusion removal mechanism around open eye in ladle treatment // Ironmaking & Steelmaking. 2007. Vol. 34, No. 3. P. 253–261.
77. Степанов А. Т., Суворин Н. Н. Изучение механизма удаления неметаллических включений при продувке металла в ковше аргоном // Вестник Череповецкого государственного университета. 2014. Т. 60, № 7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-mehanizma-udaleniya-nemetallicheskikh-vklyucheniya-pri-produvke-metalla-v-kovshe-argonom>
78. Xiliang Guo, Jianbo Yu, Xingfu Ren et al. The mechanism of inclusion removal from molten steel by dissolved gas flotation // Ironmaking & Steelmaking. 2017. P. 1–7.
79. Свяжев А. Г., Романович Д. А. Фильтрация неметаллических включений // ИЗВЕСТИЯ высших учебных заведений. Черная металлургия. 1997. Т. 40. № 3. С. 16–19.
80. de J. S. Barreto J., Meza M. A. Barrón, Morales R. D. Physical and Mathematical Modeling of Steel Flow and Heat Transfer in Tundishes under Non–isothermal and Non–adiabatic Conditions // ISIJ International. 1996. Vol. 36. No. 5. P. 543–552.
81. Joo S., Guthrie R. I. L. Heat Flow and Inclusion Behaviour in a Tundish for Slab Casting // Canadian Metallurgical Quarterly. 1991. Vol. 30, No. 4. P. 261–269.
82. Govindarajan S., Dutta R., Chatterjee A. Tata Steel Fluid dynamics and heat transfer consideration in Tata Steel's six–strand billet caster // IISC : the 6th International Iron and Steel Congress : proceedings : October 21–26, 1990, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. / Ed. by Nihon Tekkō Kyōkai. Tokyo, Japan : Iron and Steel Institute of Japan, 1990. Vol. 3: Steelmaking I. P. 197–206.

83. Zhukov D., Pyszko R. Steady mathematical model of ladle furnace heat work // Sborník příspěvků v ydalo Vysoké učení technické v Brně, 2012. / Ed. by Ing. Jan Jedelský, Ph.D. a Ing. Lubomír Klimeš.
84. Гресс А. В., Огурцов А. П., Пикус М. И. Исследование гидродинамики потоков металла в шестиручьевом промежуточном ковше различной конструкции // Теория и практика металлургии. 2000. № 3. С. 19–21.
85. Sahai Yogeshwar, Emi Toshihiko. Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes. // ISIJ International. 1996. Vol. 36, No. 6. P. 667–672.
86. Либерман А. Л., Дубровник И. В., Коржавин В. А. и др. Фильтрация стали в процессе непрерывной разливки // Сталь. 1992. № 4. С. 16–18.
87. Kumar Anil, Koria Satish C., Mazumdar Dipak. An Assessment of Fluid Flow Modelling and Residence Time Distribution Phenomena in Steelmaking Tundish Systems // ISIJ International. 2004. Vol. 44, No. 8. P. 1334–1341.
88. Аникаева А. А., Казачков Е. А. Математическое моделирование коагуляции и удаления неметаллических включений в промковше слябовой МНЛЗ // Вестник Приазовского государственного технического университета: Сб. науч. тр. Мариуполь : ПГТУ, 2000. Т. 9. С. 49–54.
89. Craig K. J., de Kock D. J., Makgata K. W., de Wet G. J. Mathematical Modeling of Iron and Steel Making Processes. Design Optimization of a Single-strand Continuous Caster Tundish Using Residence Time Distribution Data. // ISIJ International. 2001. Vol. 41, No. 10. P. 1194–1200.
90. Lee S. M., Koo Y. S., Kang T. et al. Mathematical and physical modelling of 3-D fluid flow in a tundish with dam and weir // IISC : the 6th International Iron and Steel Congress : proceedings : October 21–26, 1990, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. / Ed. by Nihon Tekkō Kyōkai. Tokyo, Japan : Iron and Steel Institute of Japan, 1990. Vol. 3: Steelmaking I. P. 239–245.

91. Szekely T., Trapaga Q. Mathematical models of fluid flow phenomena in tundish operation // Metec Congress '94. 2nd European Continuous Casting Conf., Düsseldorf, June 20–22 1994. Preprints. Vol. 1. P. 40–45.
92. Ramos-Banderas A., Morales R. D., García-Demedices L., Díaz-Cruz M. Mathematical Simulation and Modeling of Steel Flow with Gas Bubbling in Trough Type Tundishes // ISIJ International. 2003. Vol. 43, No. 5. P. 653–662.
93. Jha Pradeep K., Dash Sukanta K., Kumar Sanjay. Fluid Flow and Mixing in a Six Strand Billet Caster Tundish: A Parametric Study. // ISIJ International. 2001. Vol. 41, No. 12. P. 1437–1446.
94. Byrne M., Cramb F. W. Operating experience with large tundishes // 70th Steelmaking Conference Proceedings: Volume 70, Pittsburgh Meeting, March 29 – April 1, 1987. Pittsburgh, PA : I&S Society AIME, 1987. P. 81–90.
95. Masaki Mabuchi, Yutaka Yoshii, Tsutomu Nozaki et al. Automatic Control of Molten Steel Temperature in Tundish and Application to Stainless Steel Casting // KAWASAKI STEEL GIHO. 1985. Vol. 17, No. 4. P. 365–371.
96. Nagayasu Bessho, Hisao Yamasaki, Tetsuya Fujii et al. Removal of Inclusion from Molten Steel in Continuous Casting Tundish. // ISIJ International. 1992. Vol. 32, No. 1. P. 157–163.
97. Руденко Р. В., Лиференко Н. Т., Гаркуша А. А. Определение оптимальных геометрических параметров газлифтной камеры промежуточного ковша МНЛЗ // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. Донецк : ДонГТУ, 2001. Т. 15. С. 238–245.
98. Кафаров В. В., Глебов М. Б. Математическое моделирование основных процессов химических производств. М. : Высшая школа, 1991. 400 с.
99. Зекели Дж., Эль-Кадах Н. Компьютерное конструирование (CAD-CAM метод) промежуточного разливочного устройства // Инжекционная металлургия'86. Труды конференции SCANINJECT IV, 4rd International

Conference on Injection Metallurgy, Luleå, Sweden, June 11–13, 1986 / перевод с англ. под ред. В. А. Кудрина. М. : Metallurgia, 1990. С. 134–146.

100. Смирнов А. Н., Куберский С. В., Штепан Е. В. Непрерывная разливка стали: учебник. Донецк : ДонНТУ, 2011. 482 с. ISBN: 978-966-310-250-4.

101. Лапин Ю. В. Статистическая теория турбулентности: прошлое и настоящее (краткий очерк идей). Изд. 2-е // Научно технические ведомости. 2004. № 2(36). С. 7–19.

102. Гарбарук А. В., Стрелец М. Х., Шур М. Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие. СПб : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 88 с.

103. Лапин Ю. В., Стрелец М. Х. Внутренние течения газовых смесей. М. : Наука, 1989. 368 с.

104. Spalart P. R. Strategies for turbulence modelling and simulations // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2000. Vol. 21, No. 3. P. 252–263. URL: <https://www.csc.kth.se/~jhoffman/archive/papers/SpalartTurb2000.pdf>

105. Merder T., Warzecha M., Warzecha P. Large-Eddy Simulations of a Flow Characteristics in a Multi-Strand Continuous Casting Tundish // Archives of Metallurgy and Materials. 2015. Vol. 60, No. 4. P. 2923–2926.

106. Warzecha M., Merder T., Warzecha P. Investigation of the Flow Structure in the Tundish with the Use of Rans and Les Methods // Archives of Metallurgy and Materials. 2015. Vol. 60, No. 1. P. 215–220.

107. Spalart Phillippe R. RANS modelling into a second century // International Journal of Computational Fluid Dynamics. 2009. Vol. 23, No. 4. P. 291–293.

108. Pradeep K. Jha, Rajeev Ranjan, Swasti S. Mondal, Sukanta K. Dash Mixing in a tundish and a choice of turbulence model for its prediction // International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow. 2003. Vol. 13, No. 8. P. 964–996.

109. Siddiqui Md. Irfanul Haque, Jha Pradeep Kumar. Grade Mixing Analysis in Steelmaking Tundish using Different Turbulence Models // Proceedings of the 5th

International and 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014) December 12th–14th, 2014. IIT Guwahati, Assam, India. URL: <http://www.iitg.ernet.in/aimtdr2014/PROCEEDINGS/papers/118.pdf>

110. Недопекин Ф. В. Теория тепломассопереноса: Учеб. Пособие. Донецк : ДонГУ, 1991. 172 с.

111. Wilcox David C. Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries, Inc., 1994. 460 p. ISBN: 9780963605108.

112. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М. : Мир, 1980. 616 с.

113. Андерсон Д., Таннехил Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2-х т.; пер. с англ. М. : Мир, 1990. 782 с.

114. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. Учебник для вузов. 3-е, перераб. и доп. изд. М. : Энергия, 1975. 488 с.

115. Носоченко О. В., Исаев О. Б., Лепихов Л. С. и др. Снижение осевой ликвации в непрерывнолитой заготовке путем микролегирования // Металлург. 2003. № 6. С. 45–46.

116. Ефимова В. Г., Ефимов Г. В., Диук Е. Ф. Продувка фурмами большой протяженности промежуточных разливочных устройств // Труды Международного научно-технического конгресса «Пути возрождения литейного производства в Украине в начале нового тысячелетия». Киев : ФТИМС НАН Украины, 2001. С. 23–25.

117. Xu Yonggui. A Study of Bubble and Inclusion Behaviors in a Liquid Steel Bath : PhD dissertation. KTH Royal Institute of Technology. Stockholm, 2016. 51 p. URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-190915>

118. Mazumdar Dipak, Guthrie Roderick I. L. The Physical and Mathematical Modelling of Gas Stirred Ladle Systems // ISIJ International. 1995. Vol. 35, No. 1. P. 1–20.

119. Обербах М. Высококачественные огнеупоры и системы для выплавки, обработки и разлива стали // Черная металлургия России и стран СНГ в XXI

- веке (III международная конференция). Т. 3. М. : Metallurgia, 1994. С. 98–105.
120. Clift Roland. Bubbles, Drops, and Particles. Academic Pr, 1978. ISBN: 012176950X.
121. Ростковский С. Е. Теория металлургических процессов // Труды ЦНИИЧМ, вып. 61. М. : Metallurgia, 1968. С. 8–16.
122. Дейч М. Е. Техническая газодинамика. М. : Госэнергоиздат, 1974. 671 с.
123. Кутателадзе С. С., Стырикович М. А. Гидродинамика газожидкостных систем. М. : Энергия, 1976. 296 с.
124. Глинков М. А. Тепловая работа сталеплавильных ванн. М. : Metallurgia, 1970. 407 с.
125. Zizka M., Sulc R., Ditl P. Heat transfer between gas and liquid in a bubble column // Chemical Engineering Transactions. 2017. Vol. 57. P. 1261–1266.
126. Маленков И. Г. О движении больших пузырей газа, всплывающих в жидкости // Журнал прикладной механики и технической физики. 1968. № 6. С. 130–134.
127. Zhang L., Taniguchi S. Fundamentals of inclusion removal from liquid steel by bubble flotation // International Materials Reviews. 2000. Vol. 45, No 2, P. 59-82.
128. Акаменко А. Д., Скворцов А. А. Теплоотдача в кристаллизаторах установок непрерывной разливки стали // ИЗВЕСТИЯ высших учебных заведений. Черная металлургия. 1961. Т. 4, № 10. С. 29–36.
129. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М. : Ф–М, 1990. 646 с.
130. Кутателадзе С. С., Накоряков В. Е. Теплообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск : Наука, 1984. 302 с.
131. Моделирование современных процессов внепечной обработки и непрерывной разливки стали / Исаев О. Б., Чичкарев Е. А., Кислица В. В., Шахпазов Е. Х. М. : Металлургиздат, 2008. 373 с.

ДОДАТОК А

УТВЕРЖДАЮ

и.о. Главный инженер

«ИНТЕРПАЙП НТЗ»

Г.Н.Польский

«25» 07 2012 г.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

Донецкого национального университета

С.В.Беспалова

« » 2012 г.

А К Т

внедрения результатов научно-исследовательской работы
 "Енергозбереження при розливці сталі" (12-1вв/26)
 («Энергосбережение при разливке стали»)

Мы, нижеподписавшиеся, представители Донецкого национального университета (ДонНУ) в лице и.о. заведующего научно-исследовательской частью Радио С.В., научного руководителя г/б темы №12-1вв/26, профессора Недопекина Ф.В., ответственного исполнителя г/б темы №12-1вв/26, профессора Белоусова В.В., старшего научного сотрудника Бондаренко В.И. и научного сотрудника Комарова В.Ф. с одной стороны, и представителей Нижнеднепровского трубопрокатного завода «ИНТЕРПАЙП НТЗ» в лице главного инженера Польского Г.Н., начальника мартеновского цеха Марьяна Е.Н., и. о. начальника центральной заводской лаборатории Монченко С.К.

Составили настоящий акт о том, что в «ИНТЕРПАЙП НТЗ» апробирован вычислительный алгоритм и пакет прикладных программ по определению влияния температуры, скорости разливки колесной стали и времени ее охлаждения на образование усадочных дефектов в круглых 8-ми заготовочных слитках для изготовления железнодорожных колес.

Разработанный пакет прикладных программ адаптирован для персональных IBM-совместимых компьютеров. В качестве исходной информации для расчета затвердевания слитка используется: тоннаж слитка, скорость наполнения изложницы расплавом стали, температура перегрева, температура окружающей среды, а также теплофизические параметры литейной формы, разливаемой стали и утепляющих материалов.

Применение алгоритма и программ освобождает пользователя от проведения трудоемких, дорогостоящих экспериментальных работ по выбору оптимальных параметров выплавки стали, разливки и затвердевания слитков различной конструкции.

Моделирование процесса затвердевания слитков в чугуновой или стальной изложнице позволило прогнозировать развитие гидродинамических и теплообменных процессов, а также динамику формирования усадочной раковины в слитке колесной стали, исследовать влияние скорости разливки, температуры перегрева и времени до стрипперования слитка, высоты утеплительных вкладышей на структуру металлопродукции.

Результаты математического моделирования показали, что при отливке в стальные изложницы формирование осевой части слитка находится в более благоприятных условиях, чем при отливке в чугуновые изложницы.

В результате проведенных работ рекомендовано сокращение времени отливки 8-ми заготовочных слитков с 16-18 мин до 10-16 мин, сокращение

времени охлаждения слитков в стальных изложницах до «раздевания» до 3 часов 30 минут по сравнению с 4-мя часами в чугунной изложнице.

Внесены изменения в ТИ НТЗ-М-02-2006, п.7.3.8 по сокращению длительности отливки слитков до 14-16 мин и в ТИ НТЗ-М-04-2007, п. 5.1.1 по сокращению времени охлаждения слитков в стальных изложницах до «раздевания» до 3 час 30 мин.

Изготовлена опытно-промышленная партия слитков стали марок КП-2, КП-Т, R-7, R-8, в объеме более 1440 тонн. 42 слитка отлиты в течение 10-12 мин, 3 слитка отлиты в течение 7 мин. 30 сек. Все слитки прошли контроль ОТК мартеновского цеха и переданы в колесопрокатный цех.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы при массовом производстве колесной стали составит 102 400 грн. в год.

Никаких финансовых обязательств по этому акту завод «ИНТЕРПАЙП НТЗ» не несет.

Закключение: Использование разработанного при выполнении НИР «Энергосбережение при разливке стали» пакета прикладных программ моделирования затвердевания стальных слитков в чугунной или стальной изложнице позволяет рекомендовать его для использования на промышленных предприятиях при отработке технологии отливки слитков из углеродистых марок сталей.

От «ИНТЕРПАЙП НТЗ»

От Донецкого национального
университета

Начальник мартеновского цеха

И.о. заведующего НИЧ

Радио С.В.

Е.Н.Марьян

Научный руководитель НИР,
профессор кафедры ФНПМЭ

Недопекин Ф.В.

И. о. начальника центральной
заводской лаборатории

Профессор кафедры ФНПМЭ

Белоусов В.В.

С.К. Монченко

Старший научный сотрудник

Бондаренко В.И.

Научный сотрудник

Комаров В.Ф.

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Институт новых
технологий и материалов»



В.М.Кондратенко

2012 г.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
Донецкого национального университета



С.В.Беспалова

2012 г.

А К Т

внедрения результатов научно-исследовательской работы
"Энергозбереження при розливці сталі" (12-1вв/26)
(«Энергосбережение при разливке стали»)

Мы, нижеподписавшиеся, представители Донецкого национального университета (ДонНУ) в лице и.о. заведующего научно-исследовательской частью Радио С.В., научного руководителя г/б темы №12-1вв/26, профессора Недопекина Ф.В., ответственного исполнителя г/б темы №12-1вв/26, профессора Белоусова В.В., старшего научного сотрудника Бондаренко В.И. и научного сотрудника Комарова В.Ф. с одной стороны, и представителей ООО «Институт новых технологий и материалов» (ИНТМ) в лице заместителя директора Виновия В.В., кандидата технических наук Дмитриева Ю.В., инженера Пилявского Д.В. составили настоящий акт о том, что в ООО «ИНТМ» апробирован вычислительный алгоритм и пакет прикладных программ затвердевания слитка колесной стали.

ООО «ИНТМ» специализируется на создании и совершенствовании технологических процессов производства металлопродукции на металлургических предприятиях, в том числе с использованием моделирования гидродинамических и тепломассообменных процессов. Так, например, с участием ИНТМ в 1995 – 2011 гг созданы новые технологические процессы производства литых металлических композиций из различных марок сталей, усовершенствована технология производства слитков для изготовления цельнокатаных железнодорожных колес.

С использованием результатов НИР «Энергосбережение при разливке стали» (научный руководитель – д.т.н., проф. Недопекин Ф.В.) рассчитывали влияние температуры, скорости разливки колесной стали и времени ее охлаждения на образование усадочных дефектов в круглых 8-ми заготовочных слитках для изготовления железнодорожных колес.

Расчеты использованы при отработке опытно-промышленной технологии отливки колесных слитков из стали марок КП-2, КПТ, R8 и R7 в стальных и чугунных изложницах КП-8. Технология позволила сократить до 10 мин время отливки (при 18 мин по действующей технологии) и до 3-х часов 30 мин (вместо 4-х часов) продолжительность охлаждения слитков в изложницах.

Разработанный пакет прикладных программ адаптирован для персональных IBM-совместимых компьютеров. В качестве исходной информации для расчета затвердевания слитка используется: тоннаж слитка, скорость наполнения изложницы расплавом стали, температура перегрева, температура окружающей среды, а также теплофизические параметры литейной формы, разливаемой стали и утепляющих материалов.

Моделирование процесса затвердевания слитков в чугуночной или стальной изложнице позволило прогнозировать развитие гидродинамических и теплообменных процессов, а также динамику формирования усадочной раковины в слитке колесной стали, исследовать влияние скорости разливки, температуры перегрева и времени до стрипперования слитка, высоты утеплительных вкладышей на структуру металлопродукции.

Результаты математического моделирования показали, что при отливке в стальные изложницы формирование осевой части слитка находится в более благоприятных условиях, чем при отливке в чугуночные изложницы.

Применение алгоритма и программ освобождает пользователя от проведения трудоемких, дорогостоящих экспериментальных работ по выбору оптимальных параметров выплавки стали, разливки и затвердевания слитков различной конструкции.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы при массовом производстве колесной стали может составить более 900 000 грн. в год.

Никаких финансовых обязательств по этому акту ООО «Институт новых технологий и материалов» не несет.

Заключение: Использование разработанного при выполнении НИР «Энергосбережение при разливке стали» пакета прикладных программ моделирования затвердевания стальных слитков в чугуночной или стальной изложнице, позволяет рекомендовать его для использования на промышленных предприятиях при отработке технологии отливки слитков из углеродистых марок сталей.

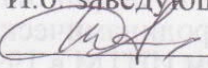
От ООО «Институт новых
технологий и материалов»

От Донецкого национального
университета

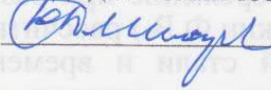
Заместитель директора

 Виновий В.В.

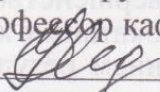
И.о. заведующего НИЧ

 Радио С.В.

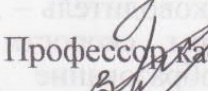
Руководитель отдела,
кандидат технических наук

 Дмитриев Ю.В.

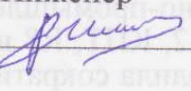
Научный руководитель НИР,
профессор кафедры ФНПМЭ

 Недопекин Ф.В.

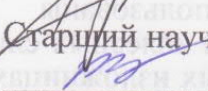
Профессор кафедры ФНПМЭ

 Белоусов В.В.

Инженер

 Пилявский Д.В.

Старший научный сотрудник

 Бондаренко В.И.

Научный сотрудник

 Комаров В.Ф.

ДОДАТОК В

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Институт новых технологий и материалов»



Д.В.Пилявский

2013 г.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
Донецкого национального
университета



С.В.Беспалова

2013 г.

АКТ

внедрения результатов научно-исследовательской работы
"Энергоэкономия при розливці сталі" (12-1вв/26)
("Энергоэкономия при разливке стали")

Мы, нижеподписавшиеся, представители Донецкого национального университета (ДонНУ) в лице и.о. заведующего научно-исследовательской частью Радио С.В., научного руководителя г/б темы №12-1вв/26, профессора Недопекина Ф.В., ответственного исполнителя г/б темы №12-1вв/26, профессора Белоусова В.В., старшего научного сотрудника Бондаренко В.И. и научного сотрудника Комарова В.Ф. с одной стороны, и представителя ООО «Институт новых технологий и материалов» (ИНТМ) в лице заместителя директора Виновия В.В. составили настоящий акт о том, что в ООО «ИНТМ» апробирован электронный учебник «МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В СТАЛЬНЫХ СЛИТКАХ»

ООО «ИНТМ» специализируется на создании и совершенствовании технологических процессов производства металлопродукции на металлургических предприятиях, в том числе с использованием моделирования гидродинамических и тепломассообменных процессов. Так, например, с участием ИНТМ в 1995 – 2011 гг. созданы новые технологические процессы производства литых металлических композиций из различных марок сталей, усовершенствована технология производства слитков для изготовления цельнокатаных железнодорожных колес.

По результатам НИР «Энергоэкономия при разливке стали» (научный руководитель – д.т.н., проф. Недопекин Ф.В.) разработан электронный учебник, основанный на научных исследованиях сотрудников ДонНУ. В учебнике предложены теоретические основы и лабораторные работы по расчету гидродинамических и теплофизических процессов в круглом стальном слитке. В лабораторных работах моделируется заливка и формирование стали в круглом стальном слитке с расчетом последующего образования открытой и закрытой усадочной раковины.

Подробное изложение математических моделей для различных видов гидродинамических и теплообменных процессов доступно в теоретической части электронного учебника.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы может составить от 80 000 грн. в год.

Никаких финансовых обязательств по этому акту ООО «Институт новых технологий и материалов» не несет.

Заключение: Использование электронного учебника как тренажера поддержки принятия решений при подготовке металлурга-технолога позволило обобщить, структурировать и автоматизировать этапы оценивания профессиональных навыков оператора для получения промежуточных и результирующей оценок в период его подготовки. Электронный учебник (тренажер) позволяет повысить информированность инструктора и уменьшить вероятность повторений тренажерной подготовки металлурга-технолога.

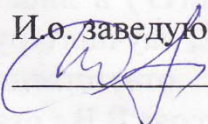
От ООО «Институт новых
технологий и материалов»

От Донецкого национального
университета

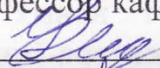
Заместитель директора

 Виновий В.В.

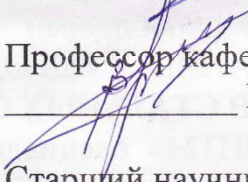
И.о. заведующего НИЧ

 Радио С.В.

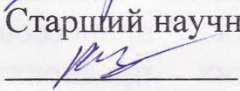
Научный руководитель НИР,
профессор кафедры ФНПМЭ

 Недопекин Ф.В.

Профессор кафедры ФНПМЭ

 Белоусов В.В.

Старший научный сотрудник

 Бондаренко В.И.

Научный сотрудник

 Комаров В.Ф.

ДОДАТОК Г

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Институт новых технологий и материалов»



Д.В.Пилявский

2013 г.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
Донецкого национального
университета



С.В.Беспалова

2013 г.

АКТ 91/12.1-34

внедрения результатов научно-исследовательской работы
"Енергозбереження при розливці сталі" (12-1вв/26)
(«Энергосбережение при разливке стали»)

Мы, нижеподписавшиеся, представители Донецкого национального университета (ДонНУ), в лице и.о. заведующего научно-исследовательской частью Радио С.В., научного руководителя г/б темы №12-1вв/26, профессора Недопекина Ф.В., ответственного исполнителя г/б темы №12-1вв/26, профессора Белоусова В.В., старшего научного сотрудника Бондаренко В.И. и научного сотрудника Комарова В.Ф. с одной стороны, и представителей ООО «Институт новых технологий и материалов» (ИНТМ) в лице заместителя директора Виновия В.В., составили настоящий акт о том, что в ООО «ИНТМ» апробирован вычислительный алгоритм и пакет прикладных программ, позволяющий рассчитать тепловую обстановку в слитке, целью сокращения времени охлаждения слитков в стальных изложницах до раздевания.

ООО «ИНТМ» специализируется на создании и совершенствовании технологических процессов производства металлопродукции на металлургических предприятиях, в том числе с использованием моделирования гидродинамических и тепломассообменных процессов. Так, например, с участием ИНТМ в 1995 – 2011 гг. созданы новые технологические процессы производства литых металлических композиций из различных марок сталей, усовершенствована технология производства слитков для изготовления цельнокатаных железнодорожных колес.

С использованием результатов НИР «Энергосбережение при разливке стали» (научный руководитель – д.т.н., проф. Недопекин Ф.В.), показана возможность сокращения времени охлаждения слитков в стальных изложницах до раздевания до 3 час 30 мин по сравнению с 4 часами в чугунной изложнице.

Разработанные рекомендации проверены при изготовлении опытно-промышленных партий слитков колесной стали марок КП-2 и R-7, R-8, КП-Т в объеме 1440 тонн. Результаты опробования подтвердили их состоятельность.

Разработанный пакет прикладных программ адаптирован для персональных IBM-совместимых компьютеров. В качестве исходной информации для расчета затвердевания слитка используется: тоннаж слитка, скорость наполнения изложницы расплавом стали, температура перегрева,

температура окружающей среды, а также теплофизические параметры литейной формы, разливаемой стали и утепляющих материалов.

Применение алгоритма и программ освобождает пользователя от проведения трудоемких, дорогостоящих экспериментальных работ по выбору оптимальных параметров выплавки стали, разливки и затвердевания слитков различной конструкции.

Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы при массовом производстве колесной стали может составить более 100 000 грн. в год.

Никаких финансовых обязательств по этому акту ООО «Институт новых технологий и материалов» не несет.

Закключение: Использование разработанного при выполнении г/б темы №12-1вв/26 «Энергосбережение при разливке стали» пакета прикладных программ для моделирования сокращения времени охлаждения слитков в стальных изложницах до 3 час 30 мин по сравнению с 4 часами в чугунной изложнице позволяет рекомендовать его для внедрения на промышленных предприятиях при отработке технологии отливки слитков из углеродистых марок сталей. Внесены изменения в ТИ НТЗ-М-04-2007, п. 5.1.1.

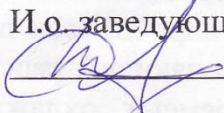
От ООО «Институт новых
технологий и материалов»

От Донецкого национального
университета

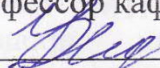
Заместитель директора

 Виновий В.В.

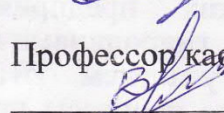
И.о. заведующего НИЧ

 Радио С.В.

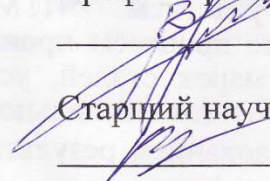
Научный руководитель НИР,
профессор кафедры ФНПМЭ

 Недопекин Ф.В.

Профессор кафедры ФНПМЭ

 Белоусов В.В.

Старший научный сотрудник

 Бондаренко В.И.

Научный сотрудник

 Комаров В.Ф.