

Мамешин В.С., Нізяєв К.Г., Журавльова С.В.

Методи візуалізації гідродинамічних процесів при «холодному» моделюванні продування

Mameshyn V.S., Nizyayev K.G., Zhuravlyova S.V.

Methods of visualization of hydrodynamic processes in "cold" modeling of blowing

У статті обговорюються основні переваги та недоліки найпоширеніших методів візуалізації циркуляційних гідродинамічних потоків. Розглянуто сфери їх застосування, обладнання, що використовується.

Метою цього дослідження були розробка оригінальної методики візуалізації гідродинамічних потоків за допомогою реоскопічної рідини та аналіз особливостей її застосування при холодному моделюванні киснево-конвертерного продування.

Для отримання реоскопічної рідини було запропоновано використовувати воду та сухий перламутровий пігмент марки KW 427

За результатами проведеного «холодного» моделювання продувки встановлено, що використання реоскопічної рідини забезпечує стабільність візуалізації гідродинамічних циркуляційних потоків і дозволяє визначати напрямки руху і розподіл циркуляційних потоків, що формуються в рідкій ванні і встановити локалізацію застійних зон.

Ключові слова: ПРОДУВКА, ГІДРОДИНАМІЧНІ ПОТОКИ, ВІЗУАЛІЗАЦІЯ, РЕОСКОПІЧНА РІДИНА

This article discusses the main advantages and disadvantages of the most common methods of hydrodynamic circulation flows visualization. The areas of their use and used equipment are considered.

The purpose of this study was to develop an original methodology for visualizing hydrodynamic flows using rheoscopic fluid and analyze the features of its use in "cold" modeling of oxygen-converter blowing.

To obtain a rheoscopic fluid, it was proposed to use water and a dry pearly pigment.

Based on the results of the "cold" modeling of blowing, it was determined that the use of rheoscopic fluid provides the stable visualization of hydrodynamic circulation flows, allows to determine the direction of movement and distribution of circulation flows that form in the liquid bath and establish the localization of stagnant areas.

Keywords: BLOWING, HYDRODYNAMIC FLOWS, VISUALIZATION, RHEOSCOPIC FLUID

З моменту своєї появи киснево-конверторний процес пройшов через ряд удосконалень і модифікацій (повсюдне впровадження сопел Лавала, перехід на багатосоплові фурми, поява конверторів донного і комбінованого дуття, використання багатоярусних фурм) при цьому його технологічний базис, що полягає в подачі струменів кисню в рідкий чавун, залишався незмінним. Таким чином, продування є одним з ключових елементів киснево-конверторного процесу, який не тільки забезпечує окислення домішок чавуну, але й ініціює складні гідродинамічні процеси, які істотно впливають як на хід плавки (хвильовування у ванні та зміна її рівня, швидкість тепло- і масопереносу), так й на загальні техніко-економічні показники процесу (винесення бризків, викиди і виноси, знос футеровки та інші) [1,2]. У зв'язку з цим аналіз характеру руху гідродинамічних потоків, що виникають у конверторній ванні, та оцінка впливу різних факторів на ці потоки є дуже важливі для розуміння закономірностей киснево-конвертерного процесу. Вивчення гідродинамічних процесів на промисловому агрегаті, пов'язане зі значними труднощами, пов'язаними з наявністю шкідливих і небезпечних факторів для дослідників у вигляді високотемпературних розпла-

вів і великої кількості шкідливих газів, складністю розміщення експериментального та реєструючого обладнання, перешкодами технологічному процесу [3]. Одним із методів, що дозволяють обійти ці труднощі, є фізичне моделювання.

Фізичне моделювання базується на рівності чисел подоби між оригіналом і моделлю, що дає можливість безпосереднього перенесення отриманих закономірностей на реальний агрегат і в залежності від наявності ресурсів і поставлених цілей фізичне моделювання може бути реалізовано як «холодне» (досліди проводять з моделюючими рідинами, що мають температуру близьку до кімнатної) так і «гаряче» (досліди проводять з розплавленим металом)[4-6].

Найбільш простим у реалізації є «холодне» моделювання яке дозволяє, використовуючи доступні та відносно дешеві матеріали, ефективно вивчати характер взаємодії фаз [7-9], гідродинаміку сталеплавильної ванни [10-12], механізм та закономірності виносів та викидів [13-15], а із залученням методів аналітичної хімії (потенціометрія, кондуктометрія, колориметрія, титриметрія) розглядати питання масопереносу компонентів та перемішування [16-18].

При проведенні «холодного» моделювання

Мамешин В.С.,	Mameshyn V.S.,
Нізяєв К.Г.,	Nizyayev K.G.,
Журавльова С.В.	Zhuravlyova S.V.

киснево-конвертерного процесу як середовище, що моделює рідкий метал, більшість дослідників використовують воду, хоча можуть застосовувати інші рідини, наприклад, ртуть [12], підфарбований спирт [19], епоксидну смолу [20] та ін. Якщо для вивчення питань, пов'язаних з аналізом режимів впровадження, розповсюдження та взаємодії газового струменя з моделюючою рідиною, внаслідок достатньо контрастної картини взаємодії між фазами, можливо обмежитися фотовідео фіксацією процесу, то для аналізу циркуляційних потоків у рідкій ванні через прозорість води, необхідно забезпечити їхню візуалізацію.

Найпростіший метод, що дозволяє візуалізувати гідродинамічні процеси, базується на імпульсному введенні в рідку ванну фарбувального реагенту (індикатора), після чого контролюється

характер руху забарвленої фази і фіксується час вирівнювання інтенсивності забарвлення в обсязі ванни. Як індикатори можуть використовуватися широкий спектр речовин: [21] – йод - крохмальний розчин; [22] - метиловий червоний/тимоловий синій; [23] - кислотно-основний індикатор (бромкрезоловий пурпурний); [24] - частинки поліетилену; [25] - харчовий барвник; [26] - метиленовий синій; [27] - фенолфталеїн; [17, 28] – розчин перманганату калію, [29] – ультрафіолетовий барвник; [18] - йод і тіосульфат натрію та ін.

Приклади візуалізації гідродинаміки рідкої ванни за рахунок введення індикатора, що забарвлює модельну рідину, при «холодному» моделюванні різних металургійних процесів представлені на рис 1.

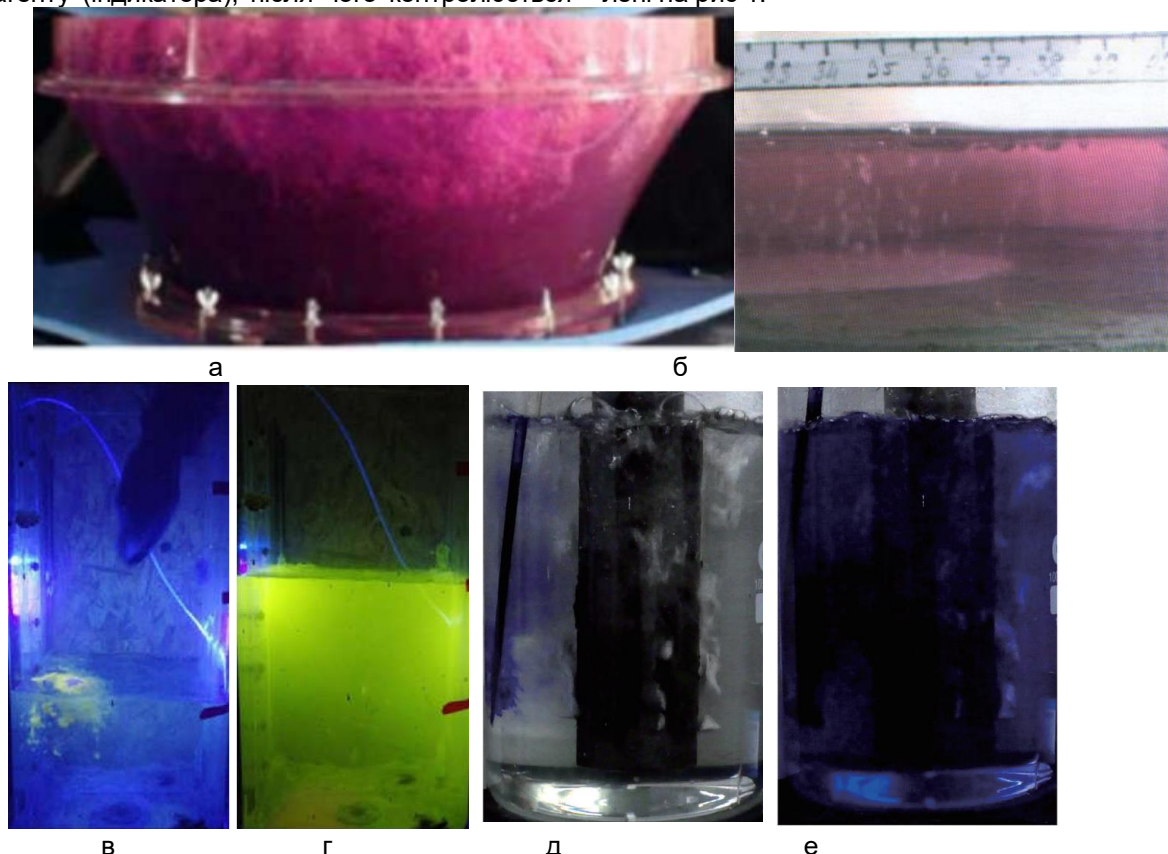


Рисунок 1 Дослідження гідродинамічних процесів з використанням різних видів трасерів (індикаторів, що забарвлюють модельну рідину).

а, б - індикатор розчин перманганату калію (а - верхнє продування в моделі конвертора [17], б - приховане донне продування в моделі подового сталеплавильного агрегату [28]);

в, г – індикатор ультрафіолетовий барвник [29] (в – введення індикатора обсяг моделі виливниці, г – фарбування модельної рідини при наповненні моделі на 50%);

д, е – індикатор метиленовий синій [26] (в – введення індикатора в обсяг моделі ковша з дзвоноподібною камерою для обробки пароподібним магнієм, г - фарбування модельної рідини через 0.8 с.)

Завдяки наочності та простоті реалізації даний метод широко застосовується при моделюванні гідродинамічних явищ практично всіх сталеплавильних процесів. Однак даючи позитивні результати при вивченні часу змішування та аналізі питань масопереносу він не дозволяє повною мірою спостерігати за рухом циркуляційних

потоків у рідкій ванні внаслідок відносно швидкого вирівнювання концентрації градієнта індикатора по всьому об'єму моделі.

Ще одним методом візуалізації, який можуть залучати при дослідженні характеристик гідродинамічних течій у сталеплавильних агрегатах, є «стробоскопічна трассерна візуалізація» [25].

Метод був розроблений у 60 р. XX століття та використовувався, наприклад, для дослідження пристінної турбулентності [30, 31].

Принципова схема установки представлена на рис. 2 [32].

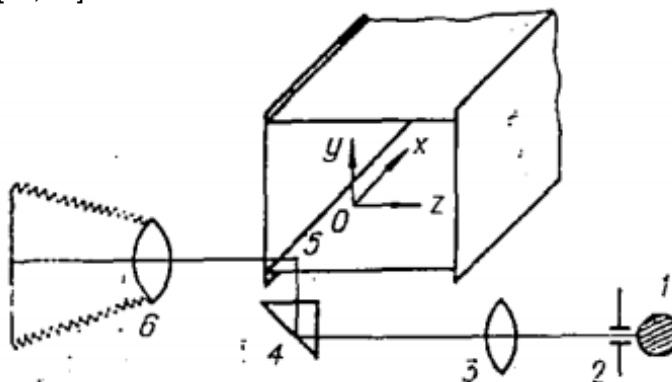


Рисунок 2. Схема установки виміру миттєвих швидкостей методом стробоскопічної візуалізації

1 – трубчаста імпульсна лампа; 2 – щілина; 3 – об'єктив; 4 – призма; 5 – канал з прозорими стінками; 6 – фото-або кінокамера.

Принцип стробоскопічної трасерної візуалізації базується на вимірюванні зміщення частинок-трасерів у заданому перерізі потоку рідини або газу за час між імпульсами джерела випромінювання [33]. Як трасери можуть використовувати дрібні тверді або рідкі частинки в газовому потоці, тверді частинки або газові бульбашки в потоці рідини, оптичні неоднорідності які штучно створюються в потоці рідини чи газу нагріванням або введенням чужорідної речовини [32].

Заданим перетином зазвичай виступає площина, що освітлюється світловим ножом, а результатом вимірювання є миттєве поле швидкості у заданій площині [34]. Характерне зображення (трасерна картина), яку зазвичай одержують при стробоскопічній візуалізації потоків у рідині та поле швидкостей руху потоків, розраховані за ними представлені на рис.3 [35, 36].

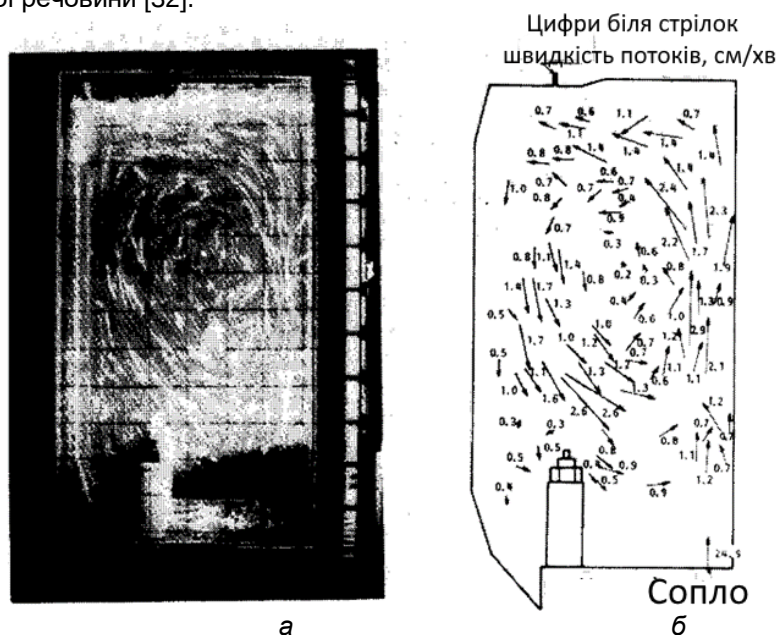


Рисунок 3 Сліди трасерів у рідині при фіксації їхнього руху методом стробоскопічної візуалізації.

а – трасерна картина; б – поле швидкостей руху потоків рідини.

На початкових етапах застосування стробоскопічної візуалізації для побудови полів швидкостей руху трасерів і відповідно визначення швидкостей руху потоків рідини використовували ручну обробку трасерних картин, що значно обме-

жувало обсяг і якість інформації, що отримують, внаслідок значної трудомісткості процесу аналізу.

Прогрес у розвитку сучасних цифрових технологій відеозапису, розробка кроскореляційних алгоритмів їх обробки за допомогою ЕОМ та застосування лазерної техніки дозволив розвинути но-

ві методи візуалізації потоків, які отримали назву – цифрової трасерної візуалізації.

У залежності від кількості компонентів швидкості зміщення трасера, які реєструють при проведенні досліджень, прийнято виділяти планарні (дві компоненти) і об'ємні (три компоненти) методи цифрової трасерної візуалізації [34].

До планарних методів відносяться Particle Image Velocimetry (PIV), Micro Particle Image Velocimetry (Micro PIV), Particle Tracking Velocimetry (PTV).

До об'ємних методів відносяться Stereo Particle Image Velocimetry (Stereo PIV),

Tomographic Particle Image Velocimetry (Tomographic PIV) [37].

Зазвичай система, що забезпечує цифрову трасерну візуалізацію, включає імпульсний твердотільний лазер (найчастіше ітрій-алюміній-гранатовий Nd:YAG) з подвійною головкою, що використовується як джерело освітлення, маленькі частинки - трасери, що додаються в течію і спеціальні кроскореляційні камери, що реєструють світло, яке відбивається часткам [38].

Принципові схеми реалізації планарного та об'ємного методу цифрової трасерної візуалізації наведені на рис. 4 [39,40]

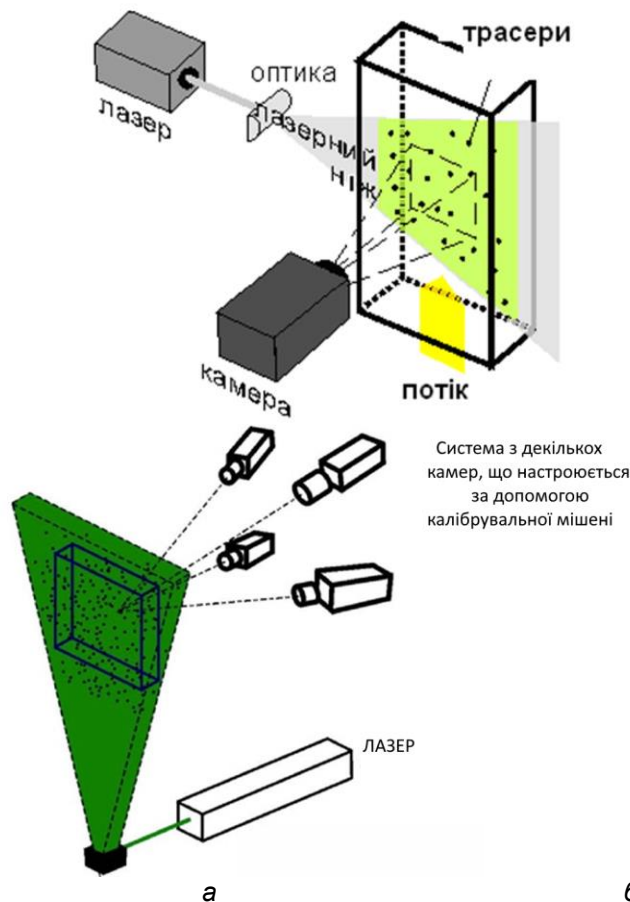


Рисунок 4 Схеми реалізацій планарного та об'ємного методу цифрової трасерної візуалізації.

а - схема Particle Image Velocimetry (PIV); б - схема Tomographic Particle Image Velocimetry (Tomographic PIV).

До основних переваг цифрової трасерної візуалізації зазвичай відносять спрощення та автоматизація процесу побудови полів швидкостей, мінімальна збурювальна дія на потік, внаслідок малих розмірів трасерів від 1 до 100 мкм [25,41,42] та широкий динамічний діапазон вимірюваних швидкостей, проте складність в експлуатації та висока вартість систем реєстрації зображення часток часто є перешкодою у використанні даних методів візуалізації.

Виходячи з основних переваг та недоліків, розглянутих методів візуалізації гідродинамічних потоків було запропоновано використовувати оригінальну методику «холодного» моделювання продування з використанням реоскопічної рідини.

Використання реоскопічних рідин для візуалізації гідродинамічних течій вперше було запропоновано Полем Матісом [43] і в наукових дослідженнях дана рідина використовується при візуалізації течії Куетта-Тейлора [44,45,46] та комірок Релея - Бенара [44].

Реоскопічна рідина є суспензією, в якій завдяки наявності дисперсної фази можна спостерігати за рухом гідродинамічних потоків неозброєним оком. У якості дисперсної фази можуть виступати анізотропні мікроскопічні частинки, що мають високі значення коефіцієнта заломлення, наприклад слюда, металеві лусочки, пігмент алюмінієвої фарби та інш., а безперервною фазою є вода або різні рідкі органічні сполуки (1,1,2,2 - тетра-

лоретен, 1,2 - дифтортетрахлоретан, тетрахлорметан, 2-гідроксіетілоктадеканат) [43,44].

При використанні реоскопічної рідини візуалізація гідродинамічних потоків відбувається завдяки анізотропії розмірів зважених у суспензії дисперсних частинок які орієнтуються відповідно до градієнта швидкості в потоках рідини і, відповідно, різні області модельної рідини будуть відбивати світло з різною інтенсивністю (в областях з більш високою швидкістю руху дисперсні частинки підхоплені потоком, будуть орієнтуватися найбільшими площинами вздовж ліній струму рідини та інтенсивно відбивають світло, тоді як в областях з низькими швидкостями дисперсні час-

тинки розташовуються хаотично і менше відбивають світло) [43,44,47].

Для отримання модельної рідини, що має реоскопічні властивості, було запропоновано використовувати воду і сухий перламутровий пігмент марки KW 427 (Cobalt Blue).

Синій перламутровий пігмент марки KW 427 містить частинки розміром 10 – 60 мкм, до його складу входить 37% слюди та 63% оксиду титану (TiO₂), щільність становить 2,45-3,2 кг/м³, маслопоглинання становить 50-90 г/ 100 г, величина pH 5 - 9 [48.49].

Фото пігменту марки KW 427 представлено на рис. 5 (світлі точки у складі пігменту - частинки слюди).



Рисунок 5 Сухий перламутровий пігмент марки KW 427 (Cobalt Blue)

Для визначення фізичних властивостей реоскопічної рідини було досліджено декілька видів суспензій, що відрізняються концентрацією розчиненого в ній пігменту марки KW 427. Основні результати, отримані при дослідженні фізичних властивостей реоскопічної рідини наведено у таблиці

Підготовка реоскопічної рідини здійснювалася шляхом попереднього зважування на аналітичних лабораторних вагах наважки пігменту масою

необхідної для досягнення заданої концентрації пігменту в суспензії. Потім наважка імпульсно подається в модельну ванну, в якій барвна основа пігменту розчиняється і фарбує воду, а частинки слюди формують суспензію та знаходяться в ній у зваженому стані.

На рис.6 наведено плексигласова плоска модель з нанесеною вимірювальною сіткою і заповнена підготовленою реоскопічною рідиною, що містить 0,4% пігменту марки KW 427.

Таблиця Фізичні властивості досліджених реоскопічних рідин із різною концентрацією пігменту при 20 °С.

Масова концентрація перламутрового пігменту марки KW 427 в реоскопічній рідині, %	Кінематична в'язкість*, мм ² /с.	Щільність, кг/м ³
0,2	1,0312	1,001
0,6	1,059	1,002
1,0	1,092	1,004

* - в'язкість модельних рідин визначали за допомогою віскозиметра ВПЗ – 4 з діаметром капіляра 0,62 мм та постійної віскозиметра 0,01094.

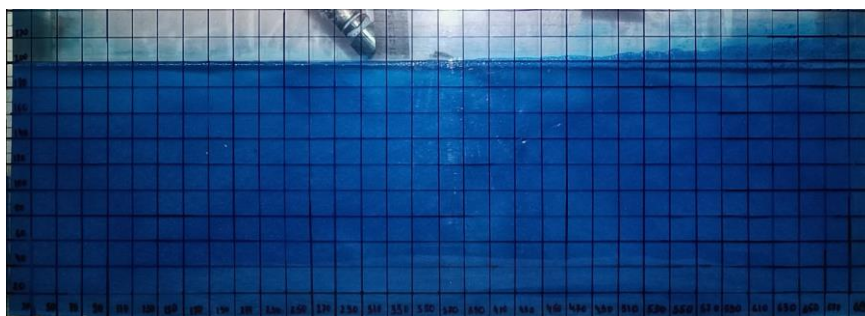
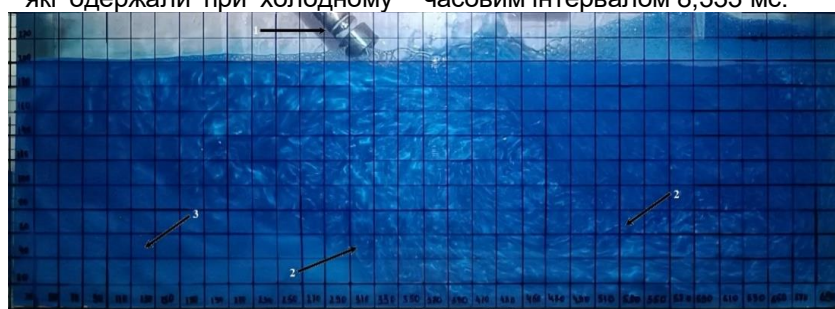


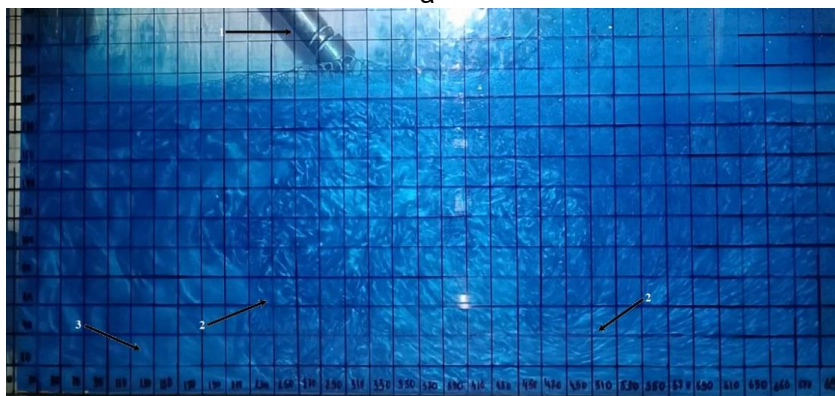
Рисунок 6 Модельна ванна з реоскопічною рідиною у спокійному стані

Отримана суспензія відповідає необхідним вимогам (має рівномірну інтенсивність забарвлення і достатню контрастність) та придатна для візуалізації гідродинамічних потоків, що виникають у рідкій ванні при моделюванні продування. Приклади кадрів, які одержали при холодному

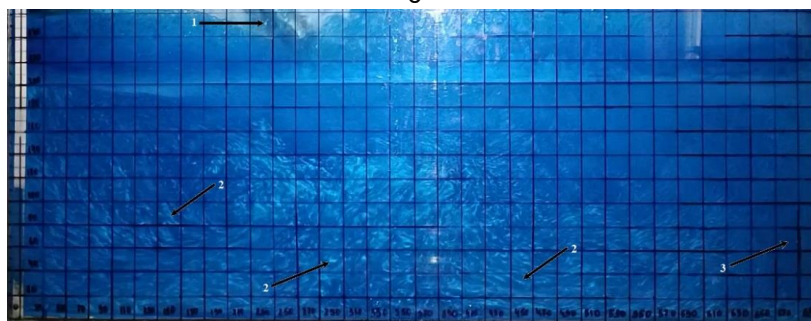
моделюванні продування з використанням реоскопічної рідини наведено на рис.7. Поведінка гідродинамічних потоків фіксували за допомогою рапідної відеозйомки (120 fps), що дозволяє простежити за рухом циркуляційних потоків рідини з часовим інтервалом 8,333 мс.



а



б



в

Рисунок 7 Візуалізація гідродинамічних потоків під час використання реоскопічної рідини
1 – модельна фурма із соплом Лавалю для подачі кисню; 2 – візуалізовані гідродинамічні потоки; 3 – застійні зони. а, б, в, – візуалізація гідродинамічних потоків реоскопічної рідини в модельній ванні при різних варіантах продування понадзвуковим кисневим струменем (умови продування: а – $d_{кр} = 1$ мм, $P_{поч} = 0,2$ МПа, $h_{соп} = 0,02$ м, $\alpha = 45^\circ$; б – $d_{кр} = 2$ мм, $P_{поч} = 0,2$ Мпа, $h_{соп} = 0,04$ м, $\alpha = 45^\circ$; в – $d_{кр} = 3$ мм, $P_{поч} = 0,2$ Мпа, $h_{соп} = 0,06$ м, $\alpha = 45^\circ$).

Для виявлення впливу параметрів продування на гідродинамічні потоки в рідкій ванні при проведенні «холодного» моделювання, варіювали основні параметри дуття (тиск дуття ($P_{\text{пoc}}$) від 2 до 4 МПа, висота розташування (h_{con}) від 10 до 30 калібрів, кут нахилу (α) від 0 до 45°, діаметр критичного перерізу ($d_{\text{кр}}$) від 1 до 3 мм). У всьому діапазоні змін основних параметрів продування застосування реоскопічної рідини дозволило гарантовано візуалізувати та фіксувати формування та рух ліній струму рідини у ванні протягом усього часу подачі дуття. Циркуляційні потоки чітко візуалізувалися як множина соспрямованих світлих ділянок різної довжини, а застійні зони як темні області.

Таким чином, використання реоскопічної рідини при «холодному» моделюванні продування забезпечує стабільність візуалізації циркуляційних гідродинамічних потоків, що дозволяє визначити напрямок руху і розподіл циркуляційних по-

токів, що формуються в рідкій ванні при продуванні і встановити локалізацію застійних зон.

Висновки

1. Візуалізація гідродинамічних потоків є одним із найважливіших методів призначених для вивчення структури течій та виявлення механізму процесів перенесення в рідинних потоках.

2. Метод візуалізації гідродинамічних потоків за допомогою реоскопічної рідини дає позитивні результати при дослідженнях питань гідродинаміки рідкої ванни кисневого-конвертора і завдяки невисокій вартості та простоті реалізації може використовуватися при дослідженнях гідродинаміки інших сталеплавильних процесів (позапічна обробка та розливання сталі).

3. При подальших дослідженнях методу візуалізації за допомогою реоскопічної рідини доцільно приділити увагу питанням побудови та аналізу полів швидкостей руху гідродинамічних потоків, що формуються в рідкій ванні під час продування.

Бібліографічний опис

1. Баптизманий В. И. Теория кислородно-конвертерного процесса. М.: Металлургия, 1975. 375 с.
2. Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л. Теория продувки сталеплавильной ванны. М.: Металлургия, 1974, 496 с.
3. Еронько С.П., Быковских С.В. Физическое моделирование процессов внепечной обработки и разлива стали. Киев: Техніка, 1998. 136 с.
4. Mazumdar, D., Evans, J.W. Modeling of Steelmaking Processes (1st ed.). CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 463 p.
5. Основы научных исследований в черной металлургии / Баптизманий В.И. и др.; под ред. Ю. Н. Яковлева. Киев, Донецк: Вища школа, 1985. 205 с.
6. Организация эксперимента: Учебное пособие / Баптизманий В. И., и др. Киев: УМК ВО, 1992. 244 с.
7. Баптизманий В.И., Охотский В.Б., Величко А.Г., Щедрин Г.А. Исследование процессов в зоне взаимодействия при продувке металла через многоканальную фурму. Сообщение 1. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1979. № 2. С. 39-42.
8. BOF cold model - Metal slag bath mass movement determination by supersonic blow from multi nozzles. Maia B., Diniz C., Pereira G., Salgado R., Tavares R. / Conference: European Steel Technology and Application Days 2017 (ESTAD 2017), Vienna, Austria, 26-29 June, 2017, Vol. 1. p. 1022-1038.
9. Hwang, H.Y., Irons, G.A. A water model study of impinging gas jets on liquid surfaces. // Metallurgical and Materials. Transactions B. 2012 Vol. 43 B. №. 4, pp. 302–315 <https://doi.org/10.1007/s11663-011-9613-3>
10. Юшкевич П. О. Молчанов Л.С. Холодное моделирование циркуляционных потоков в конвертерной ванне при комбинированной продувке. // Металознавство та термічна обробка металів. 2017. № 3. С.44–50.
11. Смирнов А.Н., Лебедев Е.Н., Шарандин К.Н. Физическое моделирование процессов перемешивания металла в конвертере с комбинированной продувкой. // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2010. № 7. С. 44-46.
12. Lee, M. S., O'Rourke, S. L., Molloy, N. A. Oscillatory flow in the steelmaking vessel. // Scandinavian Journal of Metallurgy. 2003. Vol. 32. № 5. p. 281–288 <https://doi.org/10.1034/j.1600-0692.2003.00653.x>
13. Яновский И. Л., Баптизманий В. И., Петриченко А. Г. Исследование выбросов и гидродинамики кислородно-конвертерной ванны на моделях. // Металлургическая и коксохимия. 1965. № 2. С. 8-16.
14. Шиш Ю.И., Баптизманий В.И. Костенецкий О.Н., Матюха Н.С., Жир А.В. Исследование на модели выноса брызг из конвертора при использовании перемещающихся фурм. // Металлургия и коксохимия: респ. межвед. науч. – техн. сб. К. 1975. Вып. 47. С. 10 – 15.
15. Luomala, M. J., Virtanen, E. O., Mure, P. T., Siivola, T. P., Fabritius, T. M. J., Härkki, J. J. A novel approach in the estimation of splashing in the BOF. // Steel Research. 2002. Vol. 73. № 1. p. 9–14. <https://doi.org/10.1002/srin.200200166>
16. Singh, R. P., Ghosh, D. N. Cold model study of mixing and mass transfer in LBE process of steelmaking. // ISIJ International 1990. Vol. 30. № 11. p. 955-960. <http://doi.org/10.2355/isijinternational.30.955>
17. Felipe G., Ribeiro M., Correa R., Silva R., Braga B., Maia B., Tavares R., Carvalho D., Schenk J., Measurements methodologies for basic oxygen furnace cold modeling. // Journal of Materials Research and Technology. 2021. Vol. 13. № 4.p. 834-856. <http://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.04.050>
18. Гинзбург И.П., Суринов В.А., Сизов А.М. и др. Некоторые вопросы гидрогазодинамики и массообмена в процессах металлургии и химической технологии. // Сб. Гидроаэромеханика и теория упругости. В.22. Днепропетровск: ДГУ, 1977. – С. 3-17.

19. Пинес Б. К гидромеханике бессемеровского конвертера в связи с износом его футеровки. // *Сталь*. 1934. № 8. С. 49-60.
20. Савенков А.П., Мордасов М.М. Взаимодействие струи газа с поверхностью жидкости в режиме стабильных колебаний Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. № 18. С. 25-31.
21. Effect of melting scrap on the mixing - time of bottom gas stirred melts. Koria S. C., Lange K. W. / 6th Japan-Germany seminar, Tokyo, Japan, 22-23 May, 1984, p. 91-101.
22. Melton, L. A., Lipp, C. W., Spradling, R. W., Paulson, K. A. Dismt - Determination of mixing time through color changes. // *Chemical Engineering Communication* 2002. Vol. 189. № 3. p. 322-338. <http://dx.doi.org/10.1080/00986440212077>
23. Ascanio, G., Brito-Bazán, M., Brito-De La Fuente, E., Carreau, P. J., Tanguy, P. A. Unconventional configuration studies to improve mixing times in stirred tanks. // *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2008. Vol. 80. № 4. pp. 558-565. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450800419>
24. Kuo T-Y., Kuo J-C. Determination of mixing time in a ladle-refining process using optical image processing. // *ISIJ International*. 2011. Vol. 51. № 10. pp. 1597-1600. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1597>
25. Wuppermann C., Giesselmann N., Rückert A., Pfeifer H., Odenthal H-J., Hovestädt E. A novel approach to determine the mixing time in a water model of an AOD converter. // *ISIJ International*. 2012. Vol. 52. № 10. pp. 1817 - 1823. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.1817>
26. Kumar A., Malathi M., Godiwalla K. M., Chacko E. Z., Ajmani S. K., Ranganathan S. Cold model study of submerged peripheral gas bubbling from a cylindrical dispenser. // *ISIJ International*. 2014. Vol. 54. № 10. pp. 2239-2247. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.2239>
27. Rosseburg A., Fitschen J., Wutz J., Wucherpennig T., Schlüter M. Hydrodynamic inhomogeneities in large scale stirred tanks – Influence on mixing time. // *Chemical Engineering Science*. 2018. Vol. 188. pp. 208-220. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.05.008>
28. Штапура Є.В., Бойченко Б.М., Керницький В.В., Єрак В.М. Моделювання донної продувки мартенівської ванни нейтральним газом. // *Металургическая и горнорудная промышленность*. 2006. №7. С.263-268.
29. Андрюхін Р.П. Фізичне моделювання гомогенізації сталі при фінішному легуванні у виливниці / Р.П. Андрюхін, Л.С. Молчанов, Є.В. Синегін // *Сучасні проблеми металургії*. – 2021. – № 24. – С. 4-9. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.2021.01.01>
30. Хабахпашева Е. М., Перепелица Б. В. Поля скоростей и турбулентных пульсаций при малых добавках к воде высокомолекулярных веществ // *Инженерно физический журнал*. 1968. Т.14. № 4. С. 598-602.
31. Кутателадзе С.С., Миронов Б.П., Накоряков В.Е., Хабахпашева Е.М. Экспериментальное исследование пристенных турбулентных течений. Новосибирск: Наука, 1975. 166 с.
32. Кутателадзе С.С. Пристенная турбулентность. Новосибирск: Наука. 1973. 227 с.
33. Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н. Торнадо. Москва: Физматлит, 2011. 344 с.
34. Токарев М. П., Маркович Д. М., Бильский А. В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости. // *Вычислительные технологии*. 2007. Т.12. № 3. С. 109-131.
35. Shiraishi T., Munezane S., Makino M. Measurement of low velocity field in a plenum using the flow visualization technique // *Proc. Int. Symp. on Fluid Control and Measurement*. Tokyo: Pergamon Press, 1985. С. 655-660.
36. Adrian R. J. Multi-point optical measurements of simultaneous vectors in unsteady flow - a review. // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 1986. Vol. 7. № 2. pp. 127 - 145. [https://doi.org/10.1016/0142-727X\(86\)90062-7](https://doi.org/10.1016/0142-727X(86)90062-7).
37. Ахмерова А. Н., Гайнуллина А. А. Сравнительный обзор методов реализации цифровой трассерной визуализации // *Вестник технологического университета*. 2016. Т.19. №17 С. 115 – 117.
38. Мочалин А.Е., Гонтовой С.В. Проблемы и перспективы развития информационных технологий обработки трассерных изображений. // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова* 2013. №. 3. С. 162-165.
39. Мочалін О. Є., Гонтовий С. В. Розвиток інформаційних технологій обробки цифрових трасерних зображень. // *Наукові праці ЧДУ ім. Петра Могили. Серія «Комп'ютерні технології»*. 2011. Вип. 130, Т 143. С. 88 – 93.
40. Scarano F. Tomographic PIV: principles and practice. // *Measurement Science and Technology*. 2012. Vol. 24. № 1. pp. 28. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/1/012001>
41. Маркович Д.М., Бильский А.В., Гобызов О.А. Современные тенденции развития панорамных оптических методов диагностики для аэродинамического эксперимента. КИМИЛА – 2016: материалы II Отраслевой конференции по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов, г. Жуковский, 25 - 26 окт. 2016 г. / Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского, Жуковский, 2016. С. 278 - 291.
42. Поплавский С.В., Нестеров А.Ю., Бойко В.М. Разработка и применение лазерного доплеровского анемометра с прямым спектральным анализом для исследования высокоскоростных многофазных потоков // *Теплофизика и аэромеханика*. 2020. Т 27, № 4 С.583-591.
43. Smits A. J., Lim T. T. Flow visualization: Techniques and Examples. (2nd ed.). London: Imperial College Press. 2012. 444 p. <https://doi.org/10.1142/p808>
44. Matisse P., Gorman M. Neutrally buoyant anisotropic particles for flow visualization. // *Physics of Fluids*. 1984. Vol. 27. № 4. pp. 759-760. <https://doi.org/10.1063/1.864702>
45. Abcha N., Latrache N., Dumouchel F., Mutabazi I. Qualitative relation between reflected light intensity by Kalliroscope flakes and velocity field in the Couette-Taylor flow system. // *Experiments in Fluids*. 2008. Vol. 45. № 1. pp. 85 - 94. <https://doi.org/10.1007/s00348-008-0465-9>

46. Dominguez-Lerma M. A., Ahlers G., Cannell D. S. Effects of "Kalliroscope" flow visualization particles on rotating Couette–Taylor flow. // *The Physics of Fluids*. 1985. Vol. 28. № 4. pp. 1204 - 1206. <https://doi.org/10.1063/1.864997>
47. Duda D., Yanovych V., Uruba V. Simple rheoscopic flows used in teaching fluid mechanics. // *Topical Problems of Fluid Mechanics conference*, 16 - 18 Feb 2022 г.: Prague, 2022. pp. 37-43. <https://doi.org/10.14311/TPFM.2022.006>
48. ТОВ "ХТС" [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Синій Перламутр KW427 – Режим доступу: <https://xtc.com.ua/ua/p650414735-perlamutr-sinij-kw427.html> (дата звернення 28.08.2022) – Назва з екрана.
49. Continental Trade Sp. z o.o. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Pigments, KW® Pearlescent Pigments – Режим доступу: <https://www.continentaltrade.com.pl/pigments/> (дата звернення 28.08.2022) – Назва з екрана.

Reference

1. Baptizanskij V. I. *Teoriya kislorodno-konverternogo proczessa*. M.: Metallurgiya, 1975. 375 s.
2. Yavojksij V.I., Dorofeev G.A., Povkh I.L. *Teoriya produvki staleplavil'noj vanny*. M.: Metallurgiya, 1974, 496 s.
3. Eron'ko S.P., By'kovskikh S.V. *Fizicheskoe modelirovanie proczessov vnepechnoj obrabotki i razlivki stali*. Kiev: Tekhnika, 1998. 136 s.
4. Mazumdar, D., Evans, J.W. *Modeling of Steelmaking Processes* (1st ed.). CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 463 p.
5. *Osnovy nauchny'kh issledovanij v chernoj metallurgii* / Baptizanskij V.I. i dr.; pod red. Yu. N. Yakovleva. Kiev, Doneczk: Vishha shkola, 1985. 205 s.
6. *Organizaciya e'ksperimenta: Uchebnoe posobie* / Baptizanskij V. I., i dr. Kiev: UMK VO, 1992. 244 s.
7. Baptizanskij V.I., Okhotskij V.B., Velichko A.G., Shhedrin G.A. *Issledovanie proczessov v zone vzaimodejstviya pri produvke metalla cherez mnogokanal'nyu furmu. Soobshhenie 1.* // *Izvestiya vy'sshikh uchebny'kh zavedenij. Chernaya metallurgiya*. 1979. № 2. S. 39-42.
8. BOF cold model - Metal slag bath mass movement determination by supersonic blow from multi nozzles. Maia B., Diniz C., Pereira G., Salgado R., Tavares R. / *Conference: European Steel Technology and Application Days 2017 (ESTAD 2017)*, Vienna, Austria, 26-29 June, 2017, Vol. 1. p. 1022-1038.
9. Hwang, H.Y., Irons, G.A. A water model study of impinging gas jets on liquid surfaces. // *Metallurgical and Materials. Transactions B*. 2012 Vol. 43 B. № 4, pp. 302–315 <https://doi.org/10.1007/s11663-011-9613-3>
10. Yushkevich P. O. Molchanov L.S. *Kholodnoe modelirovanie czirkulyaczionny'kh potokov v konverternoy vanne pri kombinirovannoj produvke.* // *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metali'v*. 2017. № 3. S.44–50.
11. Smirnov A.N., Lebedev E.H., Sharandin K.N. *Fizicheskoe modelirovanie proczessov peremeshivaniya metalla v konvertere s kombinirovannoj produvkoy.* // *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2010. № 7. S. 44-46.
12. Lee, M. S., O'Rourke, S. L., Molloy, N. A. Oscillatory flow in the steelmaking vessel. // *Scandinavian Journal of Metallurgy*. 2003. Vol. 32. № 5. p. 281–288 <https://doi.org/10.1034/j.1600-0692.2003.00653.x>
13. Yanovskij I. L., Baptizanskij V. I., Petrichenko A. G. *Issledovanie vy'brosov i gidrodinamiki kislorodno-konverternoy vanny' na modelyakh.* // *Metallurgicheskaya i koksokhimiya*. 1965. № 2. S. 8-16.
14. Shish Yu.I., Baptizanskij V.I. Kosteneczkiy O.N., Matyukha N.S., Zhir A.V. *Issledovanie na modeli vy'nosa bry'zg iz konvertora pri ispol'zovanii peremeshhayushhikhsya furm.* // *Metallurgiya i koksokhimiya: resp. mezhved. nauch. – tekhn. sb. K*. 1975. Vy'p. 47. S. 10 – 15.
15. Luomala, M. J., Virtanen, E. O., Mure, P. T., Siivola, T. P., Fabritius, T. M. J., Härkki, J. J. A novel approach in the estimation of splashing in the BOF. // *Steel Research*. 2002. Vol. 73. № 1. p. 9–14. <https://doi.org/10.1002/srin.200200166>
16. Singh, R. P., Ghosh, D. N. Cold model study of mixing and mass transfer in LBE process of steelmaking. // *ISIJ International* 1990. Vol. 30. № 11. p. 955-960. <http://doi.org/10.2355/isijinternational.30.955>
17. Felipe G., Ribeiro M., Correa R, Silva, R., Braga B., Maia B., Tavares R., Carvalho D., Schenk J., *Measurements methodologies for basic oxygen furnace cold modeling.* // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 13. № 4.p. 834-856. <http://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.04.050>
18. Ginzburg I.P., Surin V.A., Sizov A.M. i dr. *Nekotory'e voprosy' gidrogazodinamiki i massoobmena v proczessakh metallurgii i khimicheskoy tekhnologii.* // *Sb. Gidroe'romekhanika i teoriya uprugosti*. V.22. Dnepropetrovsk: DGU, 1977. – S. 3-17.
19. Pines B. K *gidromekhanike bessemerovskogo konvertera v svyazi s iznosom ego futerovki.* // *Stal'*. 1934. № 8. S. 49-60.
20. Savenkov A.P., Mordasov M.M. *Vzaimodejstvie strui gaza s poverkhnost'yu zhidkosti v rezhime stabil'ny'kh kolebanij Pis'ma v ZhTF*. 2016. T. 42. № 18. S. 25-31.
21. Effect of melting scrap on the mixing - time of bottom gas stirred melts. Koria S. C., Lange K. W. / *6th Japan-Germany seminar*, Tokyo, Japan, 22-23 May, 1984, p. 91-101.
22. Melton, L. A., Lipp, C. W., Spradling, R. W., Paulson, K. A. Dismt - Determination of mixing time through color changes. // *Chemical Engineering Communication* 2002. Vol. 189. № 3. p. 322–338. <http://dx.doi.org/10.1080/00986440212077>
23. Ascanio, G., Brito-Bazán, M., Brito-De La Fuente, E., Carreau, P. J., Tanguy, P. A. Unconventional configuration studies to improve mixing times in stirred tanks. // *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2008. Vol. 80. № 4. pp. 558–565. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450800419>

24. Kuo T-Y., Kuo J-C. Determination of mixing time in a ladle-refining process using optical image processing. // *ISIJ International*. 2011. Vol. 51. № 10. pp. 1597–1600. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1597>
25. Wuppermann C., Giesselmann N., Rückert A., Pfeifer H., Odenthal H-J., Hovestädt E. A novel approach to determine the mixing time in a water model of an AOD converter. // *ISIJ International*. 2012. Vol. 52. № 10. pp. 1817 - 1823. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.1817>
26. Kumar A., Malathi M., Godiwalla K. M., Chacko E. Z., Ajmani S. K., Ranganathan S. Cold model study of submerged peripheral gas bubbling from a cylindrical dispenser. // *ISIJ International*. 2014. Vol. 54. № 10. pp. 2239-2247. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.2239>
27. Rosseburg A., Fitschen J., Wutz J., Wucherpfennig T., Schlüter M. Hydrodynamic inhomogeneities in large scale stirred tanks – Influence on mixing time. // *Chemical Engineering Science*. 2018. Vol. 188. pp. 208–220. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.05.008>
28. Shtapura Ye.V., Boichenko B.M., Kernicz'kij V.V., Yerak V.M. Modelyuvannya donnoyi produvki marteni'vs'koyi vannii neitral'nim gazom. // *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promy'shlennost'*. 2006. №7. S.263-268.
29. Andryukhi'n R.P. Fi'zichne modelyuvannya gomogeni'zacii'yi stali' pri fi'ni'shnomu leguvanni' u vilivniczi' / R.P. Andryukhi'n, L.S. Molchanov, Ye.V. Sinegi'n // *Suchasni' problemi metalurgii'yi*. – 2021. – № 24. – S. 4-9. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.2021.01.01>
30. Khabakhpasheva E. M., Perepelicz B. V. Polya skorostej i turbulentny'kh pul'saczij pri maly'kh dobavkakh k vode vy'sokomolekulyarny'kh veshhestv // *Inzhenerno fizicheskij zhurnal*. 1968. T.14. № 4. S. 598-602.
31. Kutateladze S.S., Mironov B.P., Nakoryakov V.E., Khabakhpasheva E.M. E'ksperimental'noe issledovanie pristenny'kh turbulentny'kh techenij. Novosibirsk: Nauka, 1975. 166 s.
32. Kutateladze S.S. Pristennaya turbulentnost'. Novosibirsk: Nauka. 1973. 227 s.
33. Varaksin A.Yu., Romash M.E., Kopejczev V.N. Tornado. Moskva: Fizmatlit, 2011. 344 s.
34. Tokarev M. P., Markovich D. M., Bil'skij A. V. Adaptivny'e algoritmy' obrabotki izobrazhenij chasticz dlya rascheta mgnovenny'kh polej skorosti. // *Vy'chislitel'ny'e tekhnologii*. 2007. T.12. № 3. S. 109-131.
35. Shiraishi T., Munezane S., Makino M. Measurement of low velocity field in a plenum using the flow visualization technique // *Proc. Int. Symp. on Fluid Control and Measurement*. Tokyo: Pergamon Press, 1985. S. 655-660.
36. Adrian R. J. Multi-point optical measurements of simultaneous vectors in unsteady flow - a review. // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 1986. Vol. 7. № 2. rr. 127 - 145. [https://doi.org/10.1016/0142-727X\(86\)90062-7](https://doi.org/10.1016/0142-727X(86)90062-7)
37. Akhmerova A. N., Gajnullina A. A. Sravnitel'ny'j obzor metodov realizaczii czifrovoj trassernoj vizualizaczii // *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2016. T.19. №17 S. 115 – 117.
38. Mochalin A.E., Gontovoj S.V. Problemy' i perspektivy' razvitiya informaczionny'kh tekhnologij obrabotki trasserny'kh izobrazhenij. // *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova* 2013. №. 3. S. 162-165.
39. Mochali'n O. Ye., Gontovij S. V. Rozvitok i'nformaczij'nykh tekhnologij' obrobki czifrovikh trasernikh zobrazhen'. // *Naukovi' praczi' ChDU i'm. Petra Mogili. Seri'ya «Komp'yuterni' tekhnologii'yi»*. 2011. Vip. 130, T 143. S. 88 – 93.
40. Scarano F. Tomographic PIV: principles and practice. // *Measurement Science and Technology*. 2012. Vol. 24. № 1. rr. 28. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/1/012001>
41. Markovich D.M., Bil'skij A.V., Goby'zov O.A. Sovremenny'e tendenczii razvitiya panoramny'kh opticheskikh metodov diagnostiki dlya ae'rodynamiceskogo e'ksperimenta. KIMILA – 2016: materialy' II Otrassevoj konfe-rencziya po izmeritel'noj tekhnike i metrologii dlya issledovanij letatel'ny'kh apparatov, g. Zhukovskij, 25 - 26 okt. 2016 g. / *Czentral'ny'j ae'rogidrodinamicheskij institut imeni professora N. E. Zhukovskogo, Zhukovskij*, 2016. S. 278 - 291.
42. Poplavskij S.V., Nesterov A.Yu., Bojko V.M. Razrabotka i primenenie lazernogo doplerovskogo anemometra s pryamy'm spektral'ny'm analizom dlya issledovaniya vy'sokoskorostny'kh mnogofazny'kh potokov // *Teplofizika i ae'romekhanika*. 2020. T 27, № 4 S.583-591.
43. Smits A. J., Lim T. T. Flow visualization: Techniques and Examples. (2nd ed.). London: Imperial College Press. 2012. 444 p. <https://doi.org/10.1142/p808>
44. Matisse P., Gorman M. Neutrally buoyant anisotropic particles for flow visualization. // *Physics of Fluids*. 1984. Vol. 27. № 4. rr. 759-760. <https://doi.org/10.1063/1.864702>
45. Abcha N., Latrache N., Dumouchel F., Mutabazi I. Qualitative relation between reflected light intensity by Kalliros - ope flakes and velocity field in the Couette–Taylor flow system. // *Experiments in Fluids*. 2008. Vol. 45. № 1. rr. 85 - 94. <https://doi.org/10.1007/s00348-008-0465-9>
46. Dominguez-Lerma M. A., Ahlers G., Cannell D. S. Effects of "Kalliroscope" flow visualization particles on rotating Couette–Taylor flow. // *The Physics of Fluids*. 1985. Vol. 28. № 4. rr. 1204 - 1206. <https://doi.org/10.1063/1.864997>
47. Duda D., Yanovych V., Uruba V. Simple rheoscopic flows used in teaching fluid mechanics. // *Topical Problems of Fluid Mechanics conference*, 16 - 18 Feb 2022 g.: Prague, 2022. pp. 37-43. <https://doi.org/10.14311/TPFM.2022.006>
48. TOV "KhTS" [Elektronnij resurs] : [Veb-sajt]. – Sini'j Perlamutr KW427 – Rezhim dostupu: <https://xtc.com.ua/ua/p650414735-perlamutr-sini-j-kw427.html> (data zvernennya 28.08.2022) – Nazva z ekrana.
49. Continental Trade Sp. z o.o. [Elektronnij resurs] : [Veb-sajt]. – Pigments, KW® Pearlescent Pigments – Rezhim dostupu: <https://www.continentaltrade.com.pl/pigments/> (data zvernennya 28.08.2022) – Nazva z ekrana.