

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ІТТФ НАН України,
академік НАН України,

д.т.н., професор



Ю.Ф. Снежкін Ю.Ф. Снежкін
Снежкін 2024 р.

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів докторської дисертації провідного наукового співробітника відділу тепломасообміну в дисперсних системах Целеня Богдана Ярославовича на тему «Розвиток наукових основ застосування методу гідродинамічної кавітації при обробці і дегазації рідин та водоочищенні», поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Актуальність теми. На сьогоднішній день розроблення нових енергоефективних технологій для обробки і очищення рідин є одним з пріоритетних наукових напрямків. Детальне вивчення перебігу фізичних явищ на мікрорівні створює передумови для цілеспрямованого керування технологічними процесами і забезпечення оптимальних умов для їх перебігу. При застосуванні як традиційних, так і інноваційних методів для дегазації рідин існує потреба в розробленні енергоефективного і високопродуктивного промислового обладнання. Застосування ефектів гідродинамічної кавітації з цією метою є дуже перспективним, але потребує розроблення досконаліших математичних моделей для опису перебігу швидкоплинних кавітаційних явищ для точніших розрахунків і вибору оптимальних конструктивних та режимних параметрів гідродинамічних кавітаційних реакторів.

В рамках розвитку започаткованого в Інституті технічної теплофізики НАН України принципу дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) розроблені моделі, що описують динаміку одиничної бульбашки і ансамблю бульбашок, які на сьогоднішній час є одними з найбільш досконалих. Проте, застосування, як і в інших моделях, припущення про нестисливість рідини не дозволяє з високою точністю описувати перебіг стадії колапсу бульбашки

вносячи суттєві похибки в розрахунки і ускладнюючи розрахунки і вибір обладнання.

Таким чином, потреба подальших досліджень в даному напрямку є актуальною для створення сучасних енергоефективних і високопродуктивних кавітаційних технологій для очищення і обробки рідин.

Достовірність та наукова новизна одержаних результатів. Основні результати, положення та висновки, що виносяться на захист, логічно пов'язані з текстом дисертації та з опублікованими за темою дисертації науковими працями.

Ступінь обґрунтованості наукових положень та висновків, сформульованих у дисертаційній роботі. Аналіз поданої до захисту дисертації та публікацій дисертанта дозволяє дійти висновку, що наукова обґрунтованість і достовірність викладених у них результатів забезпечується коректністю вибору наукових підходів аналітичного та чисельного моделювання для вирішення задач тепломасообміну та гідродинаміки.

Чітко визначенні об'єкт та предмет дослідження, мета і завдання дисертаційної роботи. Глибоко вивченні та узагальненні результати наукових досліджень вітчизняних та зарубіжних фахівців в напрямку кавітаційних процесів, тепломасообміну і гідродинаміки в багатофазних потоках. Матеріали дисертації логічно викладені в семи розділах. Проведений аналіз значної кількості літературних джерел (470 вітчизняних та іноземних публікацій) з критичним їх осмисленням. Висновки, узагальнення, наукові положення дисертаційної роботи є достатньо фізично аргументованими, науково обґрунтованими й логічно сформульованими.

Достовірність одержаних дисертантом результатів наукового дослідження підтверджується їх апробацією на 5 науково-практичних конференціях, 39 науковими працями, 5 патентами України на винахід і 1 патентом України на корисну модель. Також достовірність отриманих результатів ґрунтується на задовільній верифікації отриманих в роботі результатів на відповідність канонічним теплофізичним та гідродинамічним положенням, а також на порівнянні отриманих результатів з опублікованими даними сторонніх авторів та на співставленні аналітичних досліджень з експериментальними результатами.

Про достатній рівень обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій свідчать відповідні акти використання результатів дисертації при викладанні навчальних дисциплін на кафедрі МАХНВ інженерно-хімічного факультету НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

Наукова новизна отриманих результатів.

У представленій дисертації вперше було одержано низку нових важливих наукових результатів, що стосуються процесів гідродинамічної кавітації в багатофазних потоках.

1. Із застосуванням математичної моделі ДОБ вперше виявлено існування ефекту розбіжності двох пульсуючих в акустичному полі різних за розміром бульбашок, що суперечить відомому закону Б'єркнеса про силову взаємодію пульсуючих бульбашок і вносить певний внесок в розуміння процесів акустичної кавітації, зокрема механізму акустичної дегазації рідини. Вперше визначено критерій переходу пульсуючих в УЗ полі двох різних за розміром бульбашок від режиму їх сходження до режиму їх розбіжності.

2. На підставі експериментальних досліджень та теоретичного аналізу на базі моделі ДБА механізмів кавітаційної обробки дисперсних рідинних сумішей в процесах водоочищення та створення водовугільних суспензій дістало подальший розвиток наукове обґрунтування методу інтенсифікації цих механізмів, який базується на застосуванні сукупності бульбашок, що динамічно розвиваються в потоці рідини, що проходить через ГДКР.

3. За допомогою моделі ДОБ проведено моделювання динаміки парогазових бульбашок у стисливій рідині з урахуванням ефектів сферичного гідравлічного удару. На основі модифікації рівняння Релея–Плесета вперше виведено просте рівняння, яке описує динаміку одиначної бульбашки в стисливій рідині. В модифіковане рівняння Релея–Плесета введено лише один параметр – коефіцієнт адіабатичної стисливості рідини β_{ad} . З урахуванням його залежності від температури це дає можливість більш точно оцінити величину стисливості рідини на границі с терміком, який перебуває в стані надкритичного флюїду.

4. Вперше встановлено критерій незворотної деформації та подальшого руйнування рідинних та газових дисперсій в зсувних течіях $(a/R)_{cr} = 2,2$, який не залежить ні від теплофізичних властивостей суцільної та дисперсної фаз, ні від числа Рейнольдса, ні від величини зсувних напружень, і може розглядатися як фізична константа. Представлена модель здатна передбачати характер деформування крапель і умови їх руйнування в зсувних течіях при відомих режимних параметрах з більшим ступенем точності, ніж існуючі емпіричні співвідношення.

5. Вперше отримано просте співвідношення для оцінки кількості повітряних мікробульбашок в одиниці об'єму води залежно від їх радіуса на базі узагальнення сукупності відомих експериментальних даних щодо вмісту вільного повітря у воді.

6. Вперше досліджено вплив концентрації мікробульбашок в рідині і їх початкового радіуса на кінетику пароутворення та визначено умови для інверсії фаз в потоці парогазорідинної суміші.

7. Дістало подальший розвиток застосування способу ГД кавітаційної дегазації рідини для нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу. Встановлено, що для ефективного перебігу процесу дегазації потрібно забезпечити гранично високу швидкість зниження тиску в рідині до мінімальних негативних значень ініціюючи зростання найменших газових зародків шляхом встановлення необхідного значення тиску на вході в сопло, вибору оптимального діаметра горловини сопла і підтримання мінімального значення тиску на виході з сопла Вентурі.

8. На основі модифікації моделей динаміки одиначної бульбашки та динаміки бульбашкового ансамблю створено модель кавітаційної дегазації рідини, використовуючи яку, проведено обчислювальні експерименти по деаерації води з використанням сопла Вентурі та РПА як ГДРК, які забезпечують можливість генерувати більше бульбашок і збільшувати час їх перебування в дифузорі перед входом в завантажувальну вакуумну камеру.

Теоретичне та практичне значення результатів дисертації.

Теоретичне значення роботи полягає в розвитку наукових основ застосування механізмів гідродинамічної кавітації в багатофазних дисперсних середовищах, зокрема, при дегазації рідин, водоочищенні та створенні альтернативних видів палива. Обґрунтовано переваги принципу ДІВЕ як ефективного і перспективного способу інтенсифікації гідромеханічних та масообмінних процесів у дисперсних рідинних середовищах, що забезпечує суттєве зниження непродуктивних витрат енергії. Сформульовано критерії ефективності механізмів ДІВЕ, найважливішим з яких є максимально швидка зміна зовнішнього тиску в газорідинній системі бульбашкової структури, з чого логічно випливає поняття кавітації. Показано, що кавітацію слід розглядати як найбільш потужний механізм ДІВЕ з точки зору динамічної та термічної дії на оточуючі макро- та мікрооб'єкти.

На основі створених в ІТТФ НАН України, в рамках розвитку теоретичних засад ДІВЕ математичних моделей ДОБ і ДБА розроблено модифіковану математичну модель, що описує динаміку парогазових бульбашок у стисливій рідині з урахуванням ефектів сферичного гідравлічного удару.

В межах дослідження кінетики кавітаційного закипання рідини розглянуто умову рівноваги бульбашок в системі «парогазові бульбашки – рідина» в процесі кавітаційного закипання рідини в ізотермічному режимі.

Виведено формули для розрахунку критичних значень тиску в рідині і радіуса бульбашки, які відповідають початку активації бульбашок та їх незворотного зростання.

Створена математична модель деформування та руйнування рідких та газових дисперсій в зсувних течіях, яка вперше дозволяє описати дані процеси в широкому інтервалі зміни режимних параметрів. Вперше встановлено критерій незворотної деформації та наступного руйнування рідинних та газових дисперсій, $(a/R)_{cr} = 2,2$ який можна розглядати як фізичну константу незалежну ні від теплофізичних властивості рідини і газу, ні від числа Рейнольдса, ні від напруження зсуву в зазорі. Проведені обчислювальні експерименти підтвердили, що для інерційного і стоксівського режимів встановлений критерій руйнування залишається справедливим.

Створена математична модель РПА циліндричного типу системи ротор–статор–ротор, що описує нестационарний рух рідини в апараті при періодичному перекритті каналів між роторами і статором з точним урахуванням питомих величин гідравлічних опорів в залежності від числа Рейнольдса. Також створена математична модель для розрахунку сопла Вентурі як кавітаційного реактора. Отримані моделі можуть бути використані як окремі субмоделі в загальній моделі динаміки парогазових бульбашок для опису розподілу лінійних швидкостей потоку і тисків по довжині каналів РПА або тиску і швидкості в потоці рідини по довжині сопла.

Проведені дослідження впливу ГД обробки в РПА на фракційний склад водовугільної суспензії, визначено режимні параметри роботи обладнання для приготування універсального водовугільного палива.

Виконані дослідження впливу ГД обробки з використанням модифікованого пульсаційного диспергатора як альтернативи РПА для готування водовугільного палива. Визначено вплив тривалості обробки на дисперсний склад суспензії.

Проведені дослідження впливу ГД обробки в РПА на зміну жорсткості води. Визначено оптимальні параметри обробки для зниження її жорсткості до $0,01$ ммоль/дм³, а також вплив швидкості зсуву та кількості циклів обробки на перебіг процесу.

Розроблена методика розрахунку сопла Вентурі як ГДКР для дегазації рідини. Встановлено, що для ефективного перебігу процесу дегазації потрібно забезпечити гранично високу швидкість зниження тиску рідини до мінімальних негативних значень ініціюючи зростання найменших газових зародків шляхом встановлення необхідного значення тиску на вході в сопло, вибору оптимального діаметра горловини сопла і підтримання мінімального значення тиску на виході з сопла Вентурі.

Розроблений алгоритм розрахунку об'ємної концентрації газових зародків у воді та початкового газовмісту, який може бути застосований для будь якої рідини, якщо при наявності достовірних експериментальних даних стосовно густини об'ємної концентрації зародків заданого фракційного складу. Проведено розрахунки концентрації бульбашок діоксиду вуглецю і його газовмісту в монодисперсній бульбашковій суміші «вода – діоксид вуглецю» для поточних значень радіуса бульбашок залежно від зовнішнього тиску і масової концентрації газу.

Виконані дослідження зміни газовмісту рідини (розчину діоксиду вуглецю в дистильованій воді) з застосуванням сопла Вентурі як ГДКР. Визначено вплив тиску перед соплом і в горловині сопла та часу обробки на ефективність перебігу процесу дегазації рідини.

Проведено експериментальні дослідження зміни водневого показника кислого конденсату димових газів з метою його нейтралізації використовуючи сопло Вентурі і РПА як кавітаційні реактори. Встановлено вплив режимних параметрів на перебіг процесу.

Практичне значення роботи полягає в тому, що запропоноване на основі отриманих результатів аналітичних та експериментальних досліджень використання кавітаційних механізмів принципу ДІВЕ може застосовуватись при розробленні енергоефективного обладнання для обробки і очищення рідин.

Створені дослідно-промислові стенди для дослідження перебігу процесу обробки і дегазації рідин з гідродинамічними кавітаційними реакторами на базі сопла Вентурі і РПА, а також дослідно-промисловий стенд для дослідження впливу гідродинамічної обробки з використанням модифікованого пульсаційного диспергатора як альтернативи РПА для готування водовугільного палива можуть бути використані при розробленні промислового обладнання.

Застосування створеної удосконаленої методики розрахунку гідродинамічних кавітаційних реакторів на базі сопла Вентурі та РПА для визначення зміни тиску рідини при проходженні через кавітаційний реактор дозволить визначати оптимальні характеристики обладнання.

Запропоновані практичні шляхи підвищення ефективності промислових кавітаційних технологій очищення води від шкідливих (агресивних) газів, водопідготовки з метою пом'якшення води і диспергування водовугільної суспензії для приготування універсального водовугільного палива можуть бути застосовані для інтенсифікації і оптимізації перебігу цих процесів у промисловому обладнанні.

Створено лабораторну установку для нейтралізації кислого конденсату димових газів, проведено експериментальні дослідження зміни водневого показника кислого конденсату і модельної рідини. Визначено оптимальні режими для проведення обробки. Встановлено, що для отримання стабільного рН не нижче 6,0 потрібно забезпечити тривалість рециркуляції (час обробки) $1,5 \div 2$ хв.

На базі лабораторної установки створений експериментальний дослідний зразок установки – нейтралізатор безреагентний, проведені його попередні випробування і визначено оптимальну продуктивність, що становить 450 л/год і може забезпечити нейтралізацію кислого конденсату від котлів сумарною тепловою потужністю щонайменше 3,2 МВт при в 2-3 рази нижчих витратах порівняно з існуючими способами.

Застосування розробленого способу для нейтралізації кислого конденсату створює умови для поліпшення стану довкілля шляхом скорочення шкідливих викидів (хімічно забрудненого нейтралізованого кислого конденсату і відходів установок пом'якшення води), раціональному використанні водних ресурсів шляхом економії природної води.

Практичне значення результатів роботи також підтверджується одержаними патентами України: спосіб обробки води (патент 114374 України на винахід), пристрій для дегазації, нейтралізації та коригування фізико-хімічних властивостей водних систем (патент 115628 України на винахід), пристрій для обробки рідини (патент 118407 України на винахід), пристрій для дегазації, нейтралізації та коригування фізико-хімічних властивостей водних систем (патент 124362 України на винахід) і роторно-імпульсний апарат (патент 99823 України на корисну модель).

Використання результатів роботи.

Отримані в дисертаційній роботі результати були використані при розробленні дослідного зразка установки для нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу в рамках виконання науково-технічної роботи за державним замовленням згідно договору №ДЗ/52-2015 з МОН України (№ ДР 0115U005525).

Отримано рекомендацію щодо можливості застосування розробленого дослідного зразка установки в технологічній схемі виробництва гранульованих мінеральних добрив для обробки води після скрубера. Впроваджено в навчальний процес отримані теоретичні результати (акт впровадження від 23.11.2017 р., кафедра МАХНВ інженерно-хімічного факультету НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»).

Створену удосконалену математичну модель для опису кінетики кавітаційних процесів впроваджено в навчальні дисципліни (акт впровадження від 08.11.2021 р., кафедра МАХНВ інженерно-хімічного факультету НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»).

Створену удосконалену методику розрахунку гідродинамічних кавітаційних реакторів на базі сопла Вентурі та РПА для застосування в технологіях дегазації та очищення рідин впроваджено в навчальні дисципліни «Процеси та обладнання хімічної технології», «Інжиніринг інноваційних технологій та обладнання» і «Перспективні напрями розвитку енерго- та ресурсоефективних процесів, обладнання та технологій» (акт впровадження від 03.12.2024 р., кафедра МАХНВ інженерно-хімічного факультету НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»).

Особистий внесок здобувача до всіх наукових публікацій, опублікованих зі співавторами та зарахованих за темою докторської дисертації.

Представлена дисертаційна робота є науковою працею, в якій висвітлено самостійні оригінальні дослідження автора, що дозволило вирішити поставлені завдання. Робота містить результати та аналіз аналітичних рішень за запропонованими методиками, результати чисельного моделювання, та результати експериментальних досліджень, отримані або сформульовані дисертантом особисто, а також висновки. Використані в дисертації ідеї, положення чи гіпотези інших авторів мають відповідні посилання і використані лише для підкріплення ідей здобувача. Усі наукові результати, положення і висновки, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто.

Повнота викладення матеріалів у публікаціях положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Наукові праці, що входять до наукометричних баз Scopus та Web of Science:

1. Obodovych Oleksandr M., Tselen Bogdan Ya., Sydorenko Vitalii V., Ivanytskyi Georgy K., Radchenko Natalia L. Application of the method of discrete-pulse energy input for water degassing in municipal and industrial boilers. Acta Periodica Technologica. 2022. Issue 53. P. 123–130. Quartile: Q3. [іноземне видання; Міжнародні наукометричні бази: Scopus]. (Вклад здобувача – постановка задачі, розробка методики дослідження, участь в обробці результатів).

2. Obodovych O., Sablii L., Sydorenko V., & Tselen B. Improving the efficiency of calcium hydrocarbonate removal and reducing water hardness through discrete pulse energy input. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. Vol. 4. No. 6 (124). P. 28–34. Quartile: Q4. [Міжнародні наукометричні бази: Scopus]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження та обробці результатів).

3. Nedbailo Anna Ye., Ivanitsky Georgiy K., Tselen Bogdan Ya, Obodovych Oleksandr M., Radchenko Natalia L. Evaluation of the efficiency of liquid degassing technology based on the principle of hydrodynamic cavitation. Acta Periodica Technologica. 2023. Issue 54. P. 237–244. Quartile: Q4. [іноземне видання; Міжнародні наукометричні бази: Scopus]. (Вклад здобувача – постановка задачі, розробка методики дослідження, участь в обробці результатів).

4. Bogdan Tselen, Georgiy Ivanitsky, Oleksandr Obodovych, Nataliya Radchenko, Anna Nedbailo, Liubov Gozhenko. Application Method of Hydrodynamic Cavitation in the Scope of Municipal Energy to Reduce the Use of Water Resources. Rocznik Ochrona Środowiska. 2023. Volume 25. P. 215–221. Quartile: Q3. [іноземне видання; Міжнародні наукометричні бази: Scopus, ISI Web of Science]. (Вклад здобувача – постановка задачі, участь в розробці методики дослідження та обробці результатів).

5. Obodovych O., Tselen B., Stepanova O., Nedbailo A., & Bulii Y. Technology and Equipment for Obtaining of Universal Hydrocarbon Fuel. Energy Technologies & Resource Saving. 2024. Vol. 78, No. 1. P. 24–33. Quartile: Q4. [Міжнародні наукометричні бази: Scopus]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження та обробці результатів).

6. Hozhenko Liubov P., Ivanitsky Georgiy K., Tselen Bogdan Ya., Radchenko Natalia L., Nedbailo Anna Ye. The application of hydrodynamic cavitation methods to increase the efficiency of the process of extracting biologically active substances from the walnut septums. Acta Periodica Technologica. 2024. Issue 55, P. 215–223. Quartile: Q4. [іноземне видання; Міжнародні наукометричні бази: Scopus]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження, обробці результатів).

7. Obodovych O. M., Tselen B. Ya., Nedbailo A. Ye., Ivanitsky G. K., Radchenko N. L., Hozhenko L. P. Comprehensive technology for utilization of acid condensate from flue gas after boiler units. Energy Technologies & Resource Saving. 2024. Vol. 81, No. 4. P. 124–133. Quartile: Q4. [Міжнародні наукометричні бази: Scopus]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження та обробці результатів).

Статті у фахових виданнях України:

8. Щепкин В.И., Целень Б.Я., Радченко Н.Л. Исследование влияния кавитации на качество эмульсии при получении топливных композиций. Наукові праці ОНАХТ. 2014. Випуск 45, Т.3. С. 196–199. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження та обробці результатів).

9. Целень Б.Я., Яроцький С.М. Нейтралізація кислих водних розчинів методом дискретно-імпульсного введення енергії. Наукові праці ОНАХТ. 2014. Випуск 45, Т.3. С. 34–39. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – постановка задачі, розробка методики дослідження, участь в обробці результатів).

10. Долинский А.А., Шурчкова Ю.А., Целень Б.Я. Технология и оборудование для нейтрализации кислых стоков. Промышленная теплотехника. 2014. Том 36, № 5. С. 98–105. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження та обробці результатів).

11. Яроцький С.М., Целень Б.Я. Перспектива використання способу дискретно-імпульсного введення енергії для нейтралізації кислих водних розчинів. Промышленная теплотехника. 2015. Том 37, № 4. С. 23–30. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – постановка задачі, розробка методики дослідження, участь в обробці результатів).

12. Целень Б.Я. Спосіб безреагентної нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу. Наукові праці ОНАХТ. 2015. Випуск 47, Т.2. С. 109–111. [Фахове видання].

13. Долінський А.А., Целень Б.Я., Гартвіг А.П., Коник А.В., Радченко Н.Л., Щепкін В.І. Утворення кислого конденсату при глибокій утилізації теплоти продуктів згоряння природного газу і обладнання для його нейтралізації. Наукові праці ОНАХТ. 2016. Т.80, Вип. 1. С. 4 – 8. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – розробка методики дослідження, участь в постановці задачі та обробці результатів).

14. Долінський А.А., Целень Б.Я., Іваницький Г.К., Коник А.В., Радченко Н.Л., Гартвіг А.П. Застосування способу дискретно-імпульсного введення енергії для нейтралізації конденсату продуктів згоряння природного газу. Наукові праці ОНАХТ. 2017. Т.81, Вип. 1. С. 9–14. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – розробка методики дослідження, участь в постановці задачі та обробці результатів).

15. Долінський А.А., Коник А.В., Радченко Н.Л., Целень Б.Я., Гоженко Л.П. Перспективність та напрямки розвитку апаратів, принцип роботи яких ґрунтується на механізмах дискретно-імпульсного введення енергії.

Промышленная теплотехника. 2017. Том 39, № 5. С. 7–11. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в розробленні обладнання, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

16. Иваницкий Г.К., Целень Б.Я., Недбайло А.Е., Коник А.В. Исследование дегазации жидкости в кавитационных течениях. Проблемы моделирования. Наукові праці ОНАХТ. 2019. Т.83, Вип. 1. С. 129–134. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні чисельного експерименту, обробці результатів).

17. Ivanitsky G.K., Tselen B.Ya., Nedbaylo A.E., Konyk A.V. Modeling the kinetics of cavitation boiling up of liquid. Фізика аеродисперсних систем. 2019. № 57. С. 136–146. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні чисельного експерименту, обробці результатів).

18. Ivanitsky G.K., Tselen B.Ya., Nedbaylo, A.E., Gozhenko, L.P. The ways of producing an unified mathematical model for the cavitating flow in hydrodynamic cavitation reactors. Теплофізика та теплоенергетика. 2020. Том 42, № 2. С. 31–38. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні чисельного експерименту, обробці результатів).

19. Іваницький Г.К., Целень Б.Я., Радченко Н.Л., Гоженко Л.П. Аналітичне дослідження механізму деформування та руйнування крапель в зсувних течіях. Теплофізика та теплоенергетика. 2021. Том 43, № 1. С. 30–37. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні чисельного експерименту, обробці результатів).

20. Ivanitsky G.K., Tselen B.Ya., Radchenko N.L., Gozhenko L.P. Modeling of water hammer effect during the single cavitating bubble oscillation. Фізика аеродисперсних систем. 2022. № 60. С. 176–186. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні чисельного експерименту, обробці результатів).

21. Іваницький Г., Целень Б., Радченко Н. Використання гідродинамічної кавітації для підвищення ефективності процесу кристалізації лактози в молочній сироватці. Scientific Works. 2022. 86(1). С. 11–16. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

22. Nedbailo A., Ivanytsky G., Tselen B. Y., Radchenko N., Gozhenko L., Shcherkin V. Застосування пульсаційного диспергатора як гідродинамічного кавітаційного реактора для готування водовугільного палива. Теплофізика та Теплоенергетика. 2023. 45(1). С. 28–34. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

23. Obodovych O., Sydorenko V., Tselen B., Rezakova T. Спосіб зниження солей жорсткості води і тепломасообмінне обладнання для його реалізації. Теплофізика та Теплоенергетика. 2023. 45(2). С. 87–94. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

24. Obodovych O., Sydorenko V., Tselen B. Y., Stepanova O. Ефект кавітації та його застосування при очищенні стічних вод об'єктів теплоенергетики, промисловості, побуту і сільського господарства. Теплофізика та Теплоенергетика. 2023. 45(4). С. 70–82. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

25. Ivanitsky G. K., Tselen B. Ya., Nedbailo A. Ye., Radchenko N. L., Gozhenko L. P. Some problems of modeling the liquid cavitation degassing. I. Acoustic cavitation. Фізика аеродисперсних систем. 2023. № 61. С. 227–240. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні чисельного експерименту, обробці результатів).

26. Недбайло А., Іваницький Г., Целень Б., Радченко Н., Гоженко, Л. Використання кавітаційних технологій для нейтралізації кислих середовищ. Ефективність процесу. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2023. (4). 60–63. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

27. Obodovych O., Tselen B., Pereiaslavl'tseva O., Stepanova O. Дискретно-імпульсне введення енергії – ефективний метод видалення гідрокарбонату кальцію та зменшення жорсткості води. Теплофізика та Теплоенергетика. 2024. 46(3). С. 33–43. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

28. Obodovych O., Tselen B. Y., Pereiaslavl'tseva O., Stepanova O. Кавітаційні технології та нове тепломасообмінне обладнання – перспективний напрямок приготування водовугільного палива. Теплофізика та Теплоенергетика. 2024. 46(3). С. 91–102. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

29. Obodovych O. M., Sablii L. A., Nedbailo A. Ye., Tselen B. Ya., Stepanova O. O. Technologies and heat exchange equipment for treatment and utilization of wastewater from thermal power plants. Вода і водоочисні технології. Науково-

технічні вісті. 2024. Том 38 № 1. С. 3–13. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

Розділи в колективних монографіях:

30. Гоженко Л., Радченко Н., Іваницький Г., Лимар А., Сидоренко В., Целень Б., Ободович О. Дискретно-імпульсне введення енергії в технологіях підготовки води. Scientific Environment of Modern Human. 2021. 1(sua19-01). С. 47–62. [Index Copernicus]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

31. Obodovych O., Sydorenko V., Tselen B., Stepanova O., Rezakova, T. Application of discrete-pulse energy input for intensification of preparation of drinking and process water by aeration oxidation. European Science. 2023. 1(sge24-01). P. 59–67. [Index Copernicus]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

32. Stepanova O., Tselen B., Sydorenko V., Obodovych, O. Wastewater treatment using cavitation effects. European Science. 2023. 2(sge20-02). P. 35–42. [Index Copernicus]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, підготовці матеріалів для публікації).

33. Buliy V., Obodovych O., Sablii L., Tselen B., Pereiaslavl'tseva O., Stepanova O. Technology and equipment for reducing water hardness through effective removal of calcium hydrocarbonate. European Science. 2024. 3(sge27-03). P. 84–94. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

Статті в закордонних виданнях:

34. Dolinskyi A.A., Obodovych O.M., Tselen B.Ya., Sydorenko V.V., Ivanytskyi H.K., Lymar A.Yu., Radchenko N.L. Intensification of water treatment technology by discrete-pulse energy input. SWorldJournal. 2022. Issue 11, Part 1. P. 56–61. [Index Copernicus]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

35. Tselen B. Ya., Radchenko N.L., Ivanytskyi H.K., Pereiaslavl'tsev O.M., Shchepkin V.I., Shulyak V.V. Features of wastewater treatment in cavitation flows. Modern engineering and innovative technologies. 2022. Issue 19, Part 1. P. 52–56. [Index Copernicus]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

36. Obodovych O.M., Ivanytsky G.K., Tselen B.Ya., Radchenko N.L., Nedbailo A.Y., Shulyak V.V. Mathematical simulation of fuels production processes

based on water-oil emulsion by hydrodynamic cavitation method. Modern engineering and innovative technologies. 2022. Issue 24, Part 1. P. 47–55. [*Index Copernicus*]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, підготовці матеріалів для публікації).

37. Bogdan TSELEN, Georgiy IVANITSKY, Anna NEDBAYLO, Nataliya RADCHENKO. Prospects for the use of cavitation mechanisms in order to reduce the consumption of natural water in municipal energy. Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES). 2022. No. 2, Vol. 6. P. 53–58. [*Crossref*]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження, виконанні досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

38. Anna NEDBAILO, Georgiy IVANITSKY, Bogdan TSELEN, Oleksandr OBODOVYCH, Nataliya RADCHENKO, Liubov GOZHENKO. Neutralization of acidic condensate obtained after combustion of natural gas using the hydrodynamic cavitation method. features and efficiency of the process. Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES). 2024. No. 1, Vol. 8. P. 12–17. [*Crossref*]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження, виконанні досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

Наукові праці, які засвідчують апробацію результатів дисертації:

39. Иваницкий Г.К., Недбайло А.Е., Коник А.В., Целень Б.Я., Гоженко Л.П. Унифицированный подход к моделированию кавитационных реакторов. XVII Міжнародна наукова конференція «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв 2018». м. Одеса. 3 – 8 вересня 2018. С. 84–89. (Вклад здобувача – співавторство наведених положень і результатів досліджень).

40. Иваницкий Г.К., Целень Б.Я., Недбайло А.Е., Коник А.В. Исследование дегазации жидкости в кавитационных течениях. Проблемы моделирования. VII Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні енерготехнології». м. Одеса. 9 – 13 вересня 2019. С. 11–16. (Вклад здобувача – співавторство наведених положень і результатів досліджень).

41. Иваницкий Г.К., Целень Б.Я., Радченко Н.Л., Гоженко Л.П. Исследование процессов дегазации жидкостей с использованием эффектов кавитации. XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». м. Харків, НТУ «ХПІ». 27–28 квітня 2021. С. 71–72. (Вклад здобувача – співавторство наведених положень і результатів досліджень).

42. Bogdan Tselen, Georgiy Ivanytskyi, Anna Nedbaylo, Nataliya Radchenko. Prospects for the use of cavitation mechanisms in order to reduce the consumption of natural water in municipal energy. VI International Scientific-Technical Conference “Actual Problems of Renewable Energy, Construction and

Environmental Engineering”. Poland, Kielce University of Technology. 24–27 November 2022. P.28. (Вклад здобувача – участь у постановці задачі і виконанні досліджень).

43. Целень Б.Я., Іваницький Г.К., Радченко Н.Л., Недбайло А.Є. Застосування кавітаційних механізмів для раціонального споживання води в енергетиці. XIII Міжнародна онлайн-конференція «Проблеми теплофізики та теплоенергетики». м. Київ. 7 – 8 листопада 2023. С. 21. (Вклад здобувача – співавторство наведених положень і результатів досліджень).

Наукові праці, які додатково відображують наукові результати дисертації:

44. Долінський А.А., Шурчкова Ю.О., Целень Б.Я. Безреагентна нейтралізація кислого конденсату продуктів згоряння природного газу та обладнання для її нейтралізації. Микро- и наноуровневые процессы в технологиях ДИВЭ: Тематический сборник статей / под общей ред. А.А. Долинского; Институт технической теплофизики НАН Украины. – К.: Академперіодика, 2015. – 464 с. С. 343–350.

45. Патент 114374 України, МПК C02F 1/66, C02F 1/34, C02F 103/02. Спосіб обробки води / Долінський А.А., Целень Б.Я., Гартвіг А.П., Коник А.В., Радченко Н.Л.; власник Інститут технічної теплофізики НАН України. Держпатент України. – № а201602746; заявл. 11.07.2016 ; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10/2017.

46. Патент 115628 України, МПК C02F 1/20, C02F 1/34, C02F 1/36, C02F 1/66, C02F 9/08. Пристрій для дегазації, нейтралізації та коригування фізико-хімічних властивостей водних систем / Долінський А.А., Шурчкова Ю.О., Гартвіг А.П., Целень Б.Я., Коник А.В., Радченко Н.Л., Маркін О.В., Шуляк В.В.; власник Інститут технічної теплофізики НАН України. Держпатент України. – № а201606178; заявл. 07.06.2016 ; опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22/2017.

47. Патент 118407 України, МПК B01F 7/28. Пристрій для обробки рідини / Долінський А.А., Гартвіг А.П., Целень Б.Я., Коник А.В., Радченко Н.Л.; власник Інститут технічної теплофізики НАН України. Держпатент України. – № а201705347; заявл. 31.05.2017 ; опубл. 10.01.2019, Бюл. № 1/2019.

48. Патент 99823 України, МПК B06B 1/10, B06B 1/18, B01F 7/12. Роторно-імпульсний апарат / Яроцький С. М., Целень Б. Я.; власники Яроцький С. М., Целень Б. Я. Держпатент України. – № u201414163; заявл. 30.12.14 ; опубл. 25.06.15, Бюл. № 12/2015.

49. Патент 124362 України, МПК C02F 1/12, C02F 1/34, C02F 1/66, C02F 1/20. Пристрій для дегазації, нейтралізації та коригування фізико-хімічних

властивостей водних систем / Гартвіг А.П., Целень Б.Я., Коник А.В., Іваницький Г.К., Радченко Н.Л., Недбайло А.Є., Шуляк В.В.; власник Інститут технічної теплофізики НАН України. Держпатент України. – № а201910901; заявл. 04.11.2019 ; опубл. 01.09.2021, Бюл. № 35/2021.

50. Патент 127191 України, МПК В01 F27/94. Пристрій для змішування рідин / Гартвіг А.П., Целень Б.Я., Іваницький Г.К., Радченко Н.Л., Гоженко Л.П.; власник Інститут технічної теплофізики НАН України. Держпатент України. – № а202006177; заявл. 24.09.2020 ; опубл. 31.05.2023, Бюл. № 22/2023.

Якість та кількість публікацій відповідають «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук».

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота, виконана Целенем Богданом Ярославовичом на тему: «Розвиток наукових основ застосування методу гідродинамічної кавітації при обробці і дегазації рідин та водоочищенні» є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішується важлива наукова проблема, що полягає у розвитку теоретичних основ гідродинамічної кавітації.

Отримані результати є новими та оригінальними і мають науково-теоретичну та практичну цінність. Зміст дисертації відповідає визначеній меті, поставлені здобувачем наукові завдання вирішені повністю, мети дослідження досягнуто. Основні положення та висновки дисертації, сформульовані здобувачем, мають незаперечну наукову новизну, повністю обґрунтовані й отримали необхідну апробацію на наукових конференціях. Структура та обсяг роботи відповідають встановленим вимогам. У публікаціях здобувача відображені всі положення дисертації.

Вищезазначене дозволяє зробити висновок про те, що дисертаційна робота Целеня Б.Я. за темою «Розвиток наукових основ застосування методу гідродинамічної кавітації при обробці і дегазації рідин та водоочищенні» відповідає вимогам п.7 та 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», що їх пред'являють до докторських дисертацій, та паспорту спеціальності 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Дисертаційна робота «Розвиток наукових основ застосування методу гідродинамічної кавітації при обробці і дегазації рідин та водоочищенні», подана Целенем Богданом Ярославовичом рекомендується до захисту на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук на спеціалізованій раді

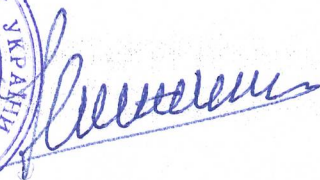
Д 26.224.01 за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Результати дисертації повністю обговорені і схвалені на розширеному засіданні секції «Тепломасообмін та теплотехнології» Вченої ради Інституту технічної теплофізики НАН України 25 грудня 2024 року.

**Головуючий на розширеному
засіданні секції «Тепломасообмін
та теплотехнології» Вченої ради
ІТТФ НАН України:**

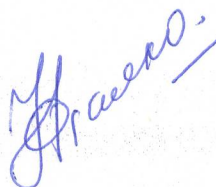
директор ІТТФ НАН України
академік НАН України,
д.т.н., професор



 Юрій СНЄЖКІН

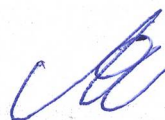
Рецензенти:

чл.-кор. НАН України, д.т.н.,
професор, зав. відділу ТЕТ



Наталія ФІАЛКО

чл.-кор. НАН України, д.т.н.,
професор, зав. відділу ТГЕТУ



Андрій АВРАМЕНКО

д.т.н., с.н.с.,
гол. наук. сп. відділу ТОЕТ



Борис ДАВИДЕНКО

в.о. Ученого секретаря
ІТТФ НАН України, д.філ.



Олег СТУПАК