

УДК 665.73

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/03>**Ярошевич М.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Соломаха А.С.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ КАВІТАЦІЙНОГО СОПЛА ТИПУ ТРУБКИ ВЕНТУРИ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ВОДО-ПАЛИВНОЇ ЕМУЛЬСІЇ

Використання водо-паливної емульсії є перспективним напрямком для впровадження у секторі теплозабезпечення побутових споживачів. У статті описано технологію, можливу для впровадження в гібридних системах постачання як допоміжну або ж на заміну системам, що працюють на електроенергії. Існує багато методів приготування емульсії: механічні, хімічні, гідродинамічна, ультразвукова. Хоча в промисловості найрозповсюдженішим є механічний спосіб емульгування, саме гідродинамічна кавітація має переваги, актуальні для даного дослідження, а саме: відносно невеликі витрати на придбання та монтаж, простота конструкції, легкість використання та обслуговування. Кавітаційне сопло типу трубки Вентурі найпростіше в будові, розповсюджене та легкозамінне. У статті розглянуто основні методи отримання емульсії, наведено основні переваги використання сопла Вентурі для гідродинамічної кавітації під час емульгування рідин. Описано кавітаційний вузол експериментального стенду для визначення безрозмірного числа кавітації, яке є характеристикою якості процесу. Також наведено розрахунки для побудови кривої залежності створюваного насосом напором від витрати при різних числах кавітації, які в подальшому буде використано для підбору обладнання з оптимальними параметрами. Актуальність теми зумовлена критичною необхідністю українського енергетичного сектору в децентралізації та посиленню автономності побутових споживачів через прогнозований дефіцит генерації електричної енергії. Існує потреба в переведенні електричних систем тепlopостачання на профіцитні види палива. Метою дослідження є розробка експериментального стенду та підбору характеристик процесу кавітації для отримання водо-паливних емульсій для подальшого спалювання їх у побутових водогрійних котлах малої потужності. Головними критеріями є доступність та усіх елементів обладнання та легкість монтажу та використання для широкого споживача.

Ключові слова: водо-паливна емульсія, кавітація, гідродинамічна кавітація, сопло Вентурі, емульгування, число кавітації, горловина, нагнітач, альтернативне паливо.

Постановка проблеми. Прогнози на опалювальний сезон 2024–2025 року в Україні вказують на можливий дефіцит електроенергії в 9ГВт, що безпосередньо вплине на тепlopостачання побутових споживачів. З огляду на це постає питання децентралізації та автономності тепlopостачання. Представлене дослідження спрямоване на розробку та впровадження нової методики виготовлення та використання водо-паливної емульсії в побутових водогрійних котлах. Розглядається можливість як впровадження технології у гібридних системах тепlopостачання так і системи, що повністю працюють на водо-емульсійному паливі.

Водо-паливна емульсія має також суттєву екологічну перевагу. Більшість апаратних технологій контролю викидів та вдосконалення систем подачі палива не здатні зменшувати викиди NOx

і твердих частинок (далі ТЧ) при збереженні продуктивності агрегату, адже відомо, що зниження максимальної температури, досягнутої під час згорання, зменшує викиди NOx, але перешкоджає повному окисленню сажі, тим самим збільшуючи викиди ТЧ [2].

Використання водо-дизельної емульсії зменшує викиди NOx [3] за рахунок зниження максимальної температури факелу в камері згорання і водночас покращує змішування та розпилення завдяки явищу мікроривбуху, що знижує викиди ТЧ [2]. Також вагомим перевагою є можливість застосування технології як до вже існуючих, так і до нових котлів, це не потребує суттєвої зміни в технології виготовлення чи експлуатації обладнання.

Вивчення водо-паливних емульсій стає актуальнішим – кількість публікацій за темою за

останні 4,5 роки зросла на 30%. Це дозволяє зробити висновок, що технологія набирає популярність і дослідників по всьому світу за рахунок можливості економії викопного палива та покращення екологічної ситуації в енергетичному секторі. Для України це, в першу чергу, можливість здешевлення вже наявної системи теплопостачання а також переходу з дефіцитних енергоресурсів на профіцитне паливо [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує багато методів отримання водо-паливної суміші. Загалом процес відбувається з додаванням поверхнево-активних речовин та без. Функція поверхнево-активної речовини полягає у створенні суміші водоемульсійного палива, яка може залишатися стабільною протягом відносно тривалого часу. Без поверхнево-активних речовин стабільність емульсійного палива знизиться. Є кілька причин, чому не вигідно використовувати ПАР. Перша причина – ціна. Поверхнево-активні речовини переважно виробляються за кордоном, тому залежність від логістики та здорожчання емульсії протилежні цілі, поставлені в нашому дослідженні. Друга причина полягає в можливості застосування емульсії в реальному часі, тобто питання довготривалої стабільності для нас не актуальне.

У промисловості найчастіше використовують механічні диспергаційні методи. Найпростішим є механічний гомогенізатор, функціонування якого базується на ротаційному принципі. В подібних установках один з найважливіших параметрів – швидкість обертання. Проте у роботі [5] дослідники хіміко-технічної лабораторії Тулузи порівняли емульгування механічним ротаційним гомогенізатором з ультразвукового обладнання. В результаті виявили, що останній не тільки виробляв менші краплі води та забезпечував вищу стабільність емульгування, але також вимагав менше споживання енергії для приготування емульсії. Питома витрата такого палива також була меншою, викиди NOx і диму вищі, а CO нижчий. Недоліком ультразвукового методу емульгування є висока вартість обладнання та необхідність професійних навичок роботи з ним. Таке обладнання не підходить для використання у побутових цілях.

Гідродинамічна кавітація використовується рідше за акустичну. Причинами цьому є гірша контрольованість процесу, неможливість точкового впливу та застосування в специфічних умовах, як от з вмістом твердих, абразивних часток. Проте в даному дослідженні використовується саме гідродинамічна кавітація через низку особливостей, а саме:

– Енергоефективність – гідродинамічна кавітація з використанням сопла Вентурі, споживає менше енергії порівняно з ультразвуковою кавітацією

– Легкість масштабування

– Простота конструкції та технічного обслуговування

– Економічна ефективність – потребує менших вкладень на встановлення та експлуатацію

Кавітація виникає, коли реакційна суміш проходить через звукувальний пристрій, такий як трубка Вентурі або діафрагма, що називається соплом. При надходженні в звукуючий пристрій швидкість суміші збільшується, а її місцевий тиск зменшується. Якщо тиск реакційної суміші падає нижче тиску пари, утворюється велика кількість бульбашок. Потім, у міру розвитку струменя рідини, тиск знову зростає і бульбашки згортаються, за рахунок чого контактна поверхня зазнає значного збільшення. Крім того, велика кількість енергії вивільняється в невеликому об'ємі внаслідок сильного колапсу бульбашок, що, як наслідок, підвищує температуру та тиск у відповідному об'ємі.

Для конструкції гідродинамічного кавітаційного реактора важливо зафіксувати параметри, що впливають на процес. Виникнення та ступінь кавітації через пристрій прогнозується за допомогою безрозмірного числа, яке називається числом кавітації (C_v), на яке сильно впливають характеристики кавітаційного пристрою (діафрагми та трубки вентурі), включаючи діаметр, коефіцієнт тиску та його геометрію. Він визначається як відношення різниці між тиском після кавітаційного пристрою (P_2) і тиском пари рідини при робочій температурі (P_v) до динамічного тиску в найвужчому місці ($0,5 \rho v^2$) таким чином [6].

$$C_v = \frac{P_2 - P_v}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (1)$$

Число кавітації дає вказівку на якість кавітації: оптимальні умови кавітації є для $C_v < 1$, а коли C_v вище 1, порожнини коливаються, а не згортаються. Це явище значно знижує ефективність кавітації, тому його слід уникати [7].

Конструкція сопла напряму впливає на число кавітації через зміну швидкості потоку та статичного тиску в рідині [8]. Діаметр горловини прямо пропорційно впливає на статичний тиск, а вихідний діаметр сопла навпаки. Форма сопла забезпечує плавний (сопло Вентурі) чи різкий (лавальне сопло, діафрагми) перехід тиску і швидкості, що впливає на стабільність та рівномірність потоку. Гладкість поверхні та довжина горловини впли-

вають на турбулентність потоку [9]. Зміна будь-якого з цих параметрів впливає на гідродинамічні умови всередині сопла і, відповідно, на значення числа кавітації. Оптимізація форми і розмірів сопла дозволяє контролювати процес кавітації для досягнення бажаних результатів у конкретному застосуванні.

Кожен тип сопла має свої специфічні переваги та підходить для конкретних завдань і процесів. Вибір сопла залежить від вимог процесу, таких як необхідна інтенсивність кавітації, масштаб процесу, а також фізичні та хімічні властивості оброблюваної рідини.

– Трубка Вентурі:

Це класичне сопло для гідродинамічної кавітації. Воно складається з звуження (конфузора), вузької частини (горловини) і розширення (дифузора). Коли рідина проходить через горловину, її швидкість збільшується, а тиск зменшується, що призводить до утворення кавітаційних бульбашок.

– Діафрагми:

У кавітаційному пристрої з діафрагмою рідина змушена пройти отвори, які розташовані на пластині, та мають відповідну площу поверхні отвору. Як правило, площа отвору становить близько 40–60 мм², при цьому загальна площа поверхні пластини становить від 300 до 500 мм².

Приклад діафрагми показаний на рис. 1. Коли рідина проходить в напрямку *a* через отвір діаметром *d*, швидкість негайно зростає в результаті зменшення площі потоку в звуженні, що призводить до явища кавітації [6]. Відповідне розташування та кількість отворів забезпечують збільшення кінетичної енергії разом із падінням тиску, а потім відповідну кавітаційну продуктивність.

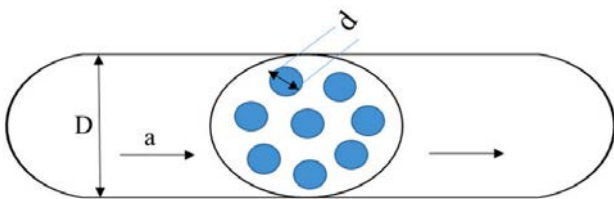


Рис. 1. Схематичне зображення діафрагми

Для створення оптимальних умов кавітації можна розглянути два підходи; по-перше, це підвищення вхідного тиску середовища, яке потребує впровадження насосів високого тиску та конструкції, здатної витримувати високий тиск. Наступним і більш простим підходом є проектування вільної площі діафрагми таким чином, щоб зменшити втрати тиску та підвищити ефективність відновлення тиску на вході за звуженням [10].

– Обертова гідродинамічна кавітація.

У цьому типі пристроїв утворення кавітаційної бульбашки відбувається завдяки відповідній конструкції ротора та швидким обертам (2200–8000 об/хв). На відміну від неротаційної гідродинамічної кавітації, у ротаційному типі кавітація генерується декількома блоками генерації кавітації, які розташовані на роторі.

Він складається з двох секцій: циліндричного ротора з деякими отворами на його поверхні і статора, який є нерухомою частиною (рис. 2).

Найважливішою частиною пристрою є циліндрична частина. Коли ротор обертається, статичний тиск рідини в отворі стає нижчим за тиск пари, і згодом виникає кавітація [11]. Оскільки ротори потребують великої потужності для руху, ці пристрої є енергоємними, що призводить до високої вартості обробки, тому їх використання в промислових масштабах є непопулярним і нерентабельним.

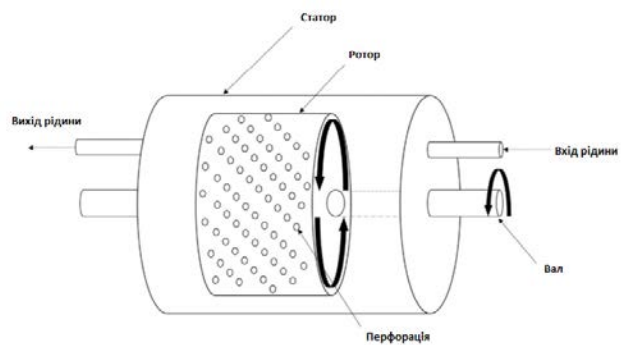


Рис. 2. Спрощена схема обертового гідродинамічного реактора

Кожен тип сопла має свої переваги і недоліки, і вибір конкретного типу залежить від конкретних завдань і умов експлуатації. У даному дослідженні було обране сопло типу трубки Вентурі через ряд переваг, серед яких відсутність рухомих частин, легкість встановлення і експлуатації, доступність побутовим споживачам, порівняно низька вартість.

Завдяки своїй простій будові трубки Вентурі були вивчені та широко використовуються в лабораторних масштабах для дослідження ефективності та механізму технології гідродинамічної кавітації. Через значне падіння тиску робочої рідини, викликане різким звуженням проточної частини, часто потрібен потужний насос, що може призвести до значних витрат.

Горловина є критичною частиною такого кавітатора. Його геометрія безпосередньо впливає як на утворення порожнин, так і на імпульс тиску, що створюється в процесі.

Було проведено багато досліджень про вплив діаметра горловини на гідродинамічну кавітацію. В [12] досліджували 2 моделі трубки Вентурі з діаметром горловини $d = 1,4$ мм та $d = 1,8$ мм (див. рис. 3) За однакового початкового тиску та фіксованою довжиною горловин, найвужче горло забезпечувало менше число кавітації ($C_v = 0,29$), що призвело до більшої ефективності попередньої обробки порівняно з ширшим горлом ($C_v = 0,44$).

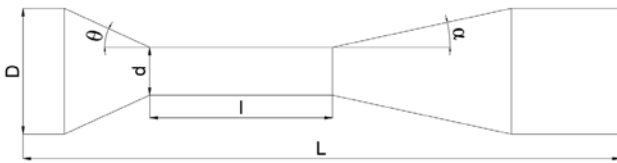


Рис. 3. Схематичне зображення сопла Вентурі

Також важливо відзначити, що зміна діаметра горловини відповідно змінює кути конвергенції (збіжності, θ) і дивергенції (розбіжності, α) трубки Вентурі. Кут розбіжності трубки Вентурі є важливим геометричним параметром, який впливає на її робочі характеристики. У кавітаційних соплах Вентурі швидкість відновлення тиску контролюється кутом розбіжності. Ці кути повинні коливатися від $\alpha = 5,0^\circ$ до $7,5^\circ$ [12] для трубки Вентурі, яка використовується в гідродинамічній кавітації, де швидкість відновлення тиску має бути сприятливою.

Встановлено, що вихідний кут трубки Вентурі є одним із основних геометричних параметрів, що впливає на робочі характеристики. Науковці інституту хімічної технології Індії [13] також провели теоретичний аналіз чотирьох трубок Вентурі з різними кутами на виході і заявили, що кути на виході секції розбіжності контролюють швидкість колапсу порожнини. Для всіх досліджених змодельованих конструкцій горловини (з вихідним кутом $\alpha = 5,5^\circ; 6,5^\circ; 7,5^\circ; 8,5^\circ$) перепад тиску в системі був однаковим (7 атм), але помітна суттєва різниця в розмірах зони низького тиску та утвореній кількості парової фази. Як і очікувалося, зі збільшенням кута розбіжності падіння тиску в розбіжній секції збільшиться, що призведе до зменшення швидкості рідини в горлі, що, у свою чергу, також збільшує число кавітації. Було встановлено, що оптимальний кут розбіжності дорівнює $5,5^\circ$, оскільки число кавітації, отримане при $5,5^\circ$, було найнижчим серед цих чотирьох.

Тиск на вході має найбільший вплив на число кавітації. Було встановлено [14], що число кавітації зменшується від $C_v = 0,76$ до $C_v = 0,29$, коли тиск на вході збільшується від 1 бар до 5 бар. Проте у тому самому дослідженні вказується,

що вхідний тиск від 6 бар і вище викликає явище суперкавітації, тобто утворення хмари порожнин, згортання яких послаблюється. Це, в свою чергу, знижує інтенсивність процесу.

Постановка завдання. Метою статті є опис методики визначення ефективності кавітаційного вузла способом розрахунку безрозмірного числа кавітації на створеному експериментальному стенді.

Виклад основного матеріалу.

Методика дослідження. В дослідженні був використаний генератор кавітації на основі трубки Вентурі, виготовлений з латуні, діаметром горловини 2,5 мм, схематичне зображення якого на рисунку 3.

Для випробування та визначення можливих чисел кавітації для обраної нами конструкції трубки Вентурі, було створено експериментальний стенд, представлений на рис. 4.

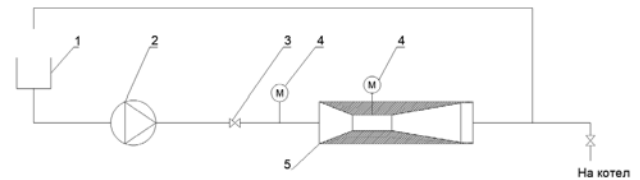


Рис. 4. Принципова схема установки з отримання емульсії методом гідродинамічної кавітації в трубці Вентурі: 1 – смісник з сумішшю води та дизеля; 2 – мембранний насос; 3 – регулюючий клапан; 4 – манометр; 5 – кавітатор

Пристрій складається з накопичувальної ємності з сумішшю води та дизеля, насоса, клапанів регулювання витрати та манометрів. Насос нагнітає тиск на вході в кавітаційний пристрій. Витрата потоку регулюється клапаном, манометри вимірюють тиск на вході в кавітатор та у найвужчому місці (горловині). Отримана емульсія за потреби проходить повторну обробку або ж надходить на котел для подальшого спалювання.



Рис. 5. Фото зібраного кавітаційного вузла з манометрами для вимірювання

За [6] кавітаційний (двофазний) потік починається при $C_v \approx 1$, плівковий режим зі стійким роз-

ділом кавітаційної порожнини від потоку а також суперкавітаційний відбувається при $C_v < 1$. Тож прийнятний для емульгування коефіцієнт має бути меншим 1, з урахуванням цього факту можна визначити залежність необхідного перепаду тиску, створюваного насосом на вході в кавітаційний вузол від витрати суміші. Проведемо розрахунок для водопровідної води кімнатної температури. Швидкість v течії рідини в найвужчому місці кавітатора:

$$v = \frac{Q}{S} \quad (2)$$

де Q – витрата рідини, л/с
 S – переріз труби, м²

Підставимо даний вираз у формулу 1, отримаємо

$$C_v = \frac{2(P_2 - P_v)}{\rho \left(\frac{Q}{S}\right)^2} \quad (3)$$

Переріз горловини трубки Вентурі з відомим діаметром d визначається як

$$S = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (4)$$

тож (3) приймає наступний вигляд

$$C_v = \frac{(P_2 - P_v) \pi^2 d^4}{8\rho Q^2} \quad (5)$$

Прийmemo C_v , мінімальне необхідне значення для початку двухфазної кавітації 0,9. Густина води за кімнатної температури 20°C за [16] $\rho = 998,2$ кг/м³

Тоді

$$Q^2 \cdot 0,9 \cdot 8 \cdot 998,2 = \delta P \cdot 3,14^2 \cdot (2,5 \cdot 10^{-3})^4 \quad (6)$$

$$\delta P = \frac{Q^2}{5,36 \cdot 10^{-14}} \quad (7)$$

Беручи до уваги розмірності, переводимо δP в атм, Q в л/хв, залежність набуває вигляду

$$\delta P = 3,1 \cdot Q^2 \quad (8)$$

Аналогічно виведемо формули для значень числа кавітації 0,5 та 0,3.

$$\delta P_{0,5} = 1,725 \cdot Q_{0,5}^2 \quad (9)$$

$$\delta P_{0,3} = 1,036 \cdot Q_{0,3}^2 \quad (10)$$

Дані, отримані при розрахунку відображені на графіку на рисунку 6.

З графіку очевидно, що при $C_v < 1$ можна отримати більшу швидкість змішування при менших затратах на нагнітання необхідного напору.

Також слід звернути увагу на те, що з використанням суміші води та палива зміниться густина робочого тіла, але характер залежності збережеться. Це дасть можливість підібрати потрібне

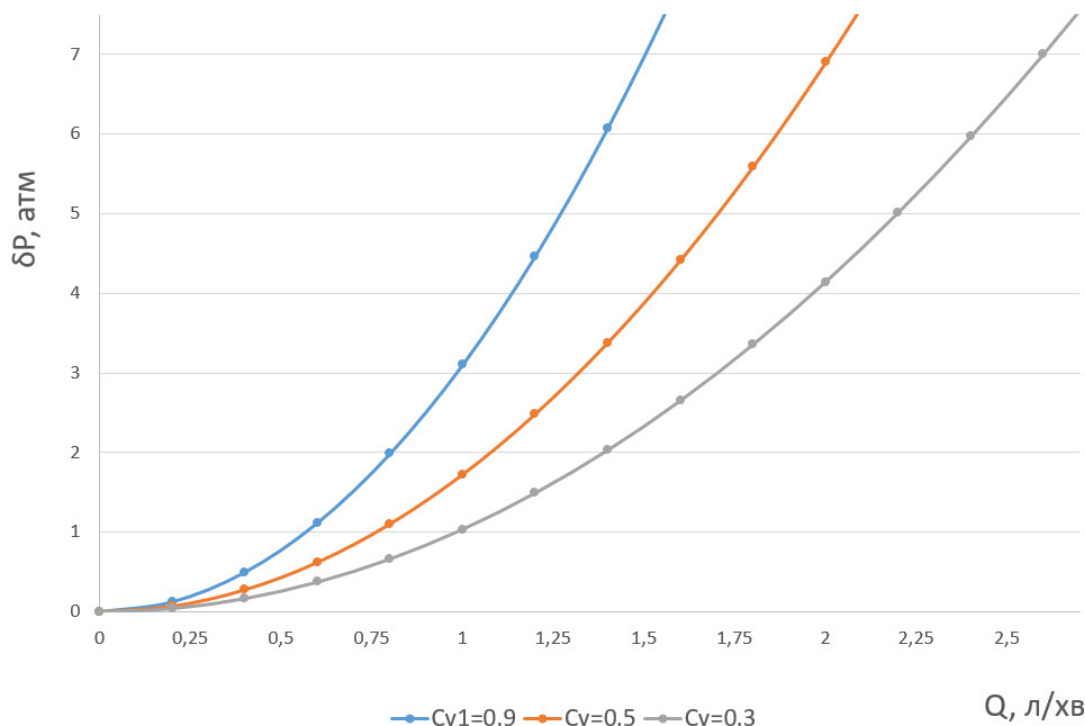


Рис. 6. Діаграма залежності різниці тисків, створеної насосом від витрати при різних числах кавітації

обладнання для дослідження та отримання оптимальних результатів з огляду на техніко-економічну складову.

Висновки. В роботі виконано аналіз наявних літературних джерел щодо використання гідродинамічної кавітації для приготування водопаливної емульсії, а також обґрунтовано вибір сопла типу трубки Вентурі для подальшого вивчення та

застосування в установці для спалювання даної емульсії. Підтримання режиму кавітації з числом C_v сильно менше за 1 дає можливість використовувати насос з більш плавною кривою продуктивності та знижує капіталоемність установки.

В наступних публікаціях буде наведено результати експериментального дослідження на виготовленому соплі.

Список літератури:

1. Шинкарик М.М., Кравець О.І. Основи теплотехніки: навч. посібник. – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2024. 132 с.
2. Мельник В. О. (2020). Аналіз складу та дисперсності паливних емульсій. Нафтогазова енергетика, (1(33)), 124–131.
3. El Shenawy, E. A., et al. Investigation and performance analysis of water-diesel emulsion for improvement of performance and emission characteristics of partially premixed charge compression ignition (PPCCI) diesel engines. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2019, 36: 100546.
4. Українське Радіо. Сьогодні. Зранку «Сергій Куюн про диверсифікацію ринку пального». <https://ukr.radio/news.html?newsID=104389>. 27.05.2024
5. Abismail B, Canselier JP, Wilhelm AM, Delmas H, Gourdon C. Emulsification by ultrasound: drop size distribution and stability. Ultrason Sonochem 1999;6:75–83.
6. R. Teran ´ Hilaes, L. Ramos, S.S. da Silva, G. Dragone, S.I. Mussatto, J.C.D. Santos, Hydrodynamic cavitation as a strategy to enhance the efficiency of lignocellulosic biomass pretreatment, Crit. Rev. Biotechnol. 38 (2018) 483–493, <https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1369932>.
7. P.R. Gogate, A.B. Pandit, Engineering design methods for cavitation reactors II: Hydrodynamic cavitation, AIChE J. 46 (2000) 1641–1649, <https://doi.org/10.1002/aic.690460815>.
8. P.R. Gogate, I.Z. Shirgaonkar, M. Sivakumar, P. Senthilkumar, N.P. Vichare, A. B. Pandit, Cavitation reactors: Efficiency assessment using a model reaction, AIChE J. 47 (2001) 2526–2538, <https://doi.org/10.1002/aic.690471115>
9. Liu X, Wu Z, Li B, Zhao J, He J, Li W, et al. Influence of inlet pressure on cavitation characteristics in regulating valve. Eng Appl Comput Fluid Mech 2020;14(1):299–310.
10. M. Gałol, A. Przyjazny, G. Boczkaj, Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – a review, Chem. Eng. J. 338 (2018) 599–627, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.049>.
11. Y.M. Oo, A. Legwiryakul, J. Thawornprasert, K. Somnuk, Production of diesel–biodiesel–water fuel nanoemulsions using three-dimensional printed rotor–stator hydrodynamic cavitation, Fuel 317 (2022), 123445, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123445>.
12. Saharan, V.K., 2016. Computational study of different venturi and orifice type hydrodynamic cavitating devices. Journal of Hydrodynamics 28, 293–305.
13. Bashir TA, Soni AG, Mahulkar AV, Pandit AB. The CFD driven optimisation of a modified venturi for cavitation activity. Can J Chem Eng 2011;89(6): 1366–75.
14. Hongbo Shi, Ruban A., Timoshchenko S., Nikrityuk P., Numerical Investigation of the Behavior of an Oil–Water Mixture in a Venturi Tube. Energy & Fuels 2020 34 (11), 15061–15067. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c02129
15. A Heat Transfer Textbook / by John H. Lienhard, V, and John H. Lienhard, IV, Cambridge, Massachusetts : Phlogiston Press, 2024.

Yaroshevych M.V., Solomakha A.S. STUDY OF THE VENTURI CAVITATION NOZZLE FOR OBTAINING A WATER-FUEL EMULSION

The use of water-fuel emulsion is a promising direction for implementation in the sector of heating for domestic consumers. The article describes a technology that can be implemented in hybrid supply systems as a supplement or replacement for systems that work on electricity. There are many methods of emulsion preparation: mechanical, chemical, hydrodynamic, ultrasonic. Although the mechanical method of emulsification is the most common in industry, it is hydrodynamic cavitation that has the advantages relevant to this study, namely: relatively low acquisition and installation costs, simplicity of construction, ease of use and maintenance. The cavitation nozzle of the Venturi tube type is the simplest in construction, widespread and easily replaceable. The article discusses the main methods of obtaining an emulsion, the main advantages of using a Venturi

nozzle for hydrodynamic cavitation during emulsification of liquids are given. The cavitation unit of the experimental stand for determining the dimensionless number of cavitation, which is a characteristic of the quality of the process, is described. Calculations are also given for constructing a curve of the dependence of the pressure created by the pump on the flow rate at different cavitation numbers, which will be used in the future to select equipment with optimal parameters. The topicality of the topic is due to the critical need of the Ukrainian energy sector to decentralize and strengthen the autonomy of household consumers due to the projected shortage of electricity generation. There is a need to transfer electric heat supply systems to surplus types of fuel. The purpose of the research is the development of an experimental stand and selection of the characteristics of the cavitation process for obtaining water-fuel emulsions for their further combustion in domestic water-heating boilers of small capacity. The main criteria are the availability of all equipment elements and ease of installation and use for the general consumer.

Key words: *water-fuel emulsion, cavitation, hydrodynamic cavitation, Venturi nozzle, emulsification, cavitation number, nozzle, supercharger, alternative fuel.*