

КОЛОСОВ О. Є., д.т.н., с.н.с., пр.н.с.; СІВЕЦЬКИЙ В. І., к.т.н., проф.;
РЯБЦЕВ Г. Л., д.н.д.у., доц.; ЛИТВИНЕНКО Є. Ю., магістрант
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ГІДРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАВІТАТОРІВ В ОБМЕЖЕНИХ ПОТОКАХ НА РЕЖИМАХ ШТУЧНОЇ КАВІТАЦІЇ

Наведено опис експериментального гідродинамічного стенду для досліджень гідродинамічних характеристик кавітаторів в обмежених потоках на режимах штучної кавітації, результати експериментальних досліджень кавітаторів у вигляді дисків і конусів із різним діаметром основи й кутом розкриття при його вершині, проаналізовано динаміку виносу газу з вентильованих каверн, а також описано особливості ежекції на режимах штучної кавітації й кавітаційного опору на режимах розвинутої кавітації.

Ключові слова: приготування біодизельного палива, штучна кавітація, кавітатор, гідродинаміка.

© Колосов О. Є., Сівецький В. І., Рябцев Г. Л., Литвиненко Є. Ю., 2014.

Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень. Перехід на використання дво- й багатоконпонентного біопалива і відмова від традиційних нафтопродуктів зараз спостерігається в багатьох країнах світу, які ці напрями звели в ранг доктрин своїх програм енергетичної безпеки. У результаті проведених авторами теоретичних і експериментальних досліджень отримані дані, в яких теоретичні розробки підтверджуються практичними результатами. Це дало поштовх для виникнення цілого ряду ідей, які стосуються створення комбінованих методів приготування дво- й багатоконпонентного біопалива і розробки нових технічних і технологічних засобів та методик їх розрахунку.

Аналіз патентно-інформаційних і літературних джерел свідчить, що сьогодні відсутнє обґрунтування вибору та комбінування найбільш ефективних методів приготування біопалива для досягнення енерго- та ресурсозбереження та збільшення виходу продукту. Для вирішення зазначеної проблеми потрібно, зокрема, експериментально дослідити удосконалену технологію приготування дво- й багатоконпонентного біопалива на базі кавітаційних методів диспергування та змішування.

Метою статті є визначення гідродинамічних характеристик кавітаторів в обмежених потоках на режимах штучної кавітації.

Опис експериментального стенда. Експериментальний стенд (рис. 1-2) складається з контактної камери 4, де встановлюють кавітаційні елементи 5 і виконують візуальні спостереження, фотографування, кінозйомку; циркуляційної системи з відцентрового насоса 15 і повітропроводу 8, завдяки якій створюється високошвидкісний потік у камері 4; абсорбційної системи з абсорбера 1 і дегазатора 9; системи вентильовання кавітаційної каверни газовим носієм, що утворюється в контактній камері 4 за кавітатором 5, у складі порожнистої гондоли 2, повітропроводу 8, вентилятора 14 і редуційного вентиля 10; систем вимірювання й змінення тиску, швидкості, температури, витрат рідкої й газової фаз.

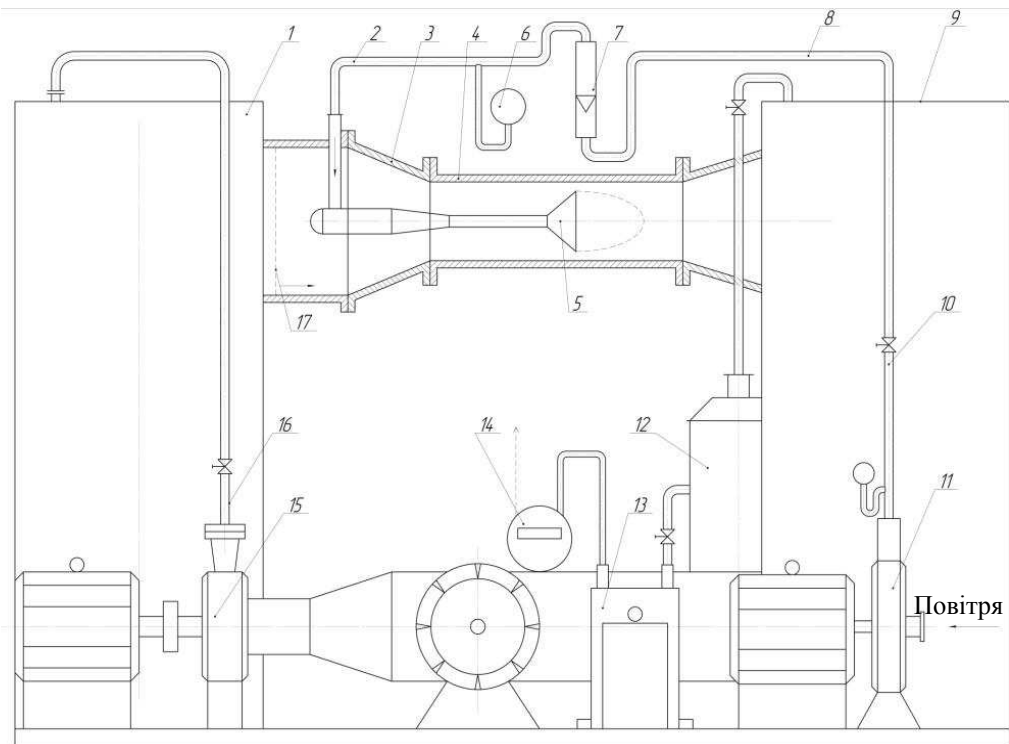


Рис. 1 – Схема експериментального гідродинамічного стенда (позначини – у тексті)



Рис. 2 – Експериментальний гідродинамічний стенд

Робочу частину стенда розташовано між абсорбером 1 і дегазатором 10. Вона складається з квадратної контактної камери 4, виконаної з кварцового скла, із діаметром робочого отвору 0,070 чи 0,115 м і довжиною 0,41 м, а також конфузора 3, що створює необхідну швидкість і падіння гідростатичного тиску на вході в камеру 4. Кавітатор 5 (у вигляді конуса, диска, кавітаційного сопла) розташовано в центрі камери 4. Кавітаційна каверна, що утворюється за кавітатором 5, вентильовується газовим носієм за допомогою порожнистої гондоли 2, сконструйованої спеціально для цих досліджень.

Відцентровий насос 15 (4К-6ПМ) потужністю 55 кВт нагнітає рідку фазу в циркуляційний контур і забезпечує її циркуляцію крізь контактну камеру 4 (рис. 3) зі швидкістю 10...15 м/с. У камері 4 встановлюють кавітатори з різним діаметром основи, щоб забезпечити різний ступінь стиску потоку. Залежно від режиму кавітації газова фаза або самозасмоктується в каверну, або нагнітається вентилятором.

Газорідинну суміш із контактної камери вільним струменем спрямовували в дегазатор 9, принцип дії якого описано в праці [1].

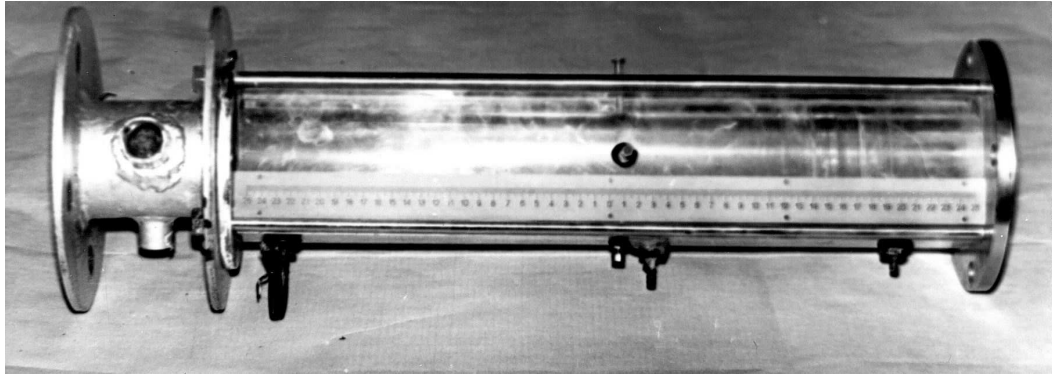


Рис. 3 – Контактна камера

Температуру газової фази вимірювали хромель-копелевою термопарою, установленою в гондолі 2, і реєстрували 12-ти каналним цифровим потенціометром А-565. Тиск у каверні вимірювали зразковим манометром 6 за допомогою тонкої металевої трубки діаметром 0,004 м, вільний кінець якої було розташовано в кавітаційній каверні. Витрату газової фази Q_0 змінювали від 0,63 до 40 м³/год, вимірювали за допомогою ротаметрів РС-5 і нормували за формулою:

$$Q = 283,73Q_0P/(kT), \quad (1)$$

де Q_0 – витрата газової фази за температури 20 °С; P – тиск у повітропроводі до ротаметра, Па; T – температура газоносія в каверні, К; k – коефіцієнт стисливості газу [2].

Відсмоктування газу, що виділяється в дегазаторі, здійснювали вакуум-насосом 13 крізь ресивер 12, а витрату вимірювали газовим лічильником 14 типу РГ-40, установленим на вихідному патрубку вакуум-насоса 13. Оскільки деяку кількість газових бульбашок виносить із потоком, було встановлено абсорбер 1, що вирівнював уміст розчиненого в рідині газу. Для стабілізації гідродинамічних коливань під верхньою кришкою абсорбера 1 було встановлено пневматичні (із пружних камер, заповнених повітрям), а на вході в конфузур – сітчастий (із дроту діаметром 2 мм і чарунками 5×5 мм) гасильники коливань.

Тиск і швидкість рідини в контактній камері регулювали засувкою 16. Контроль тиску й швидкості здійснювали за допомогою системи вакуумних кранів і зразкових манометрів.

Як модельні носії використовували воду й повітря.

Дослідження гідродинаміки кавітаційного потоку. Досліджено кавітатори у вигляді дисків і конусів різного діаметра основи із кутом розкриття (45±0,5)° (табл. 1). Це забезпечило різний ступінь стиску потоку рідини, що подавали в контактну камеру.

Таблиця 1 – Параметри досліджених кавітаторів і режимів

Діаметр основи кавітатора, м	0,035	0,04	0,049	0,056	0,063	0,0665
Діаметр контактної камери, м	0,07	0,055	0,07	0,07	0,07	0,07
Ступінь стиску потоку	0,5	0,73	0,7	0,8	0,9	0,92
Кут розкриття конуса, °	45	45	45	45	45	45
Діапазон зміни чисел Фруда	7,5...10	7...14	6,4...17	7...12	6,0...8,3	6,0...6,4

Параметри моделювання кавітаційних процесів. Виходячи з аналізу умов омивання кавітаторів, режимних параметрів, фізико-хімічних властивостей модельних рідин і газів, встановлено такі модельні параметри, що характеризують кавітаційні процеси на режимах штучної кавітації [3].

Число кавітації $\chi = 2(P_0 - P_k)/(\rho V_0^2)$, де P_0 – тиск рідини на вході в контактну камеру, Па; P_k – тиск газової фази в порожнині кавітаційної каверни, Па; ρ – густина рідини, кг/м³; V_0 – швидкість рідкої фази на вході контактну камеру, м/с.

Число Фруда $Fr = V/\sqrt{gd}$, де d – діаметр основи кавітатора, м.

Число Рейнольдса $Re = Vd\sqrt{1+\chi}/\nu$, де ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини, м²/с.

Ступінь стиску потоку $\delta = d/D$, де D – діаметр контактної камери в місці розташування кавітатора, м.

Відносна довжина кавітаційної каверни $\lambda = L/d$, де L – довжина кавітаційної каверни, м.

Кавітаційний опір $C_x = 2\Delta P/(\rho V_0^2)$, де ΔP – падіння тиску в контактній камері, Па.

Коефіцієнт ежекції $u = Q/U$, де Q , U – витрата газової й рідкої фази, відповідно.

Відносна витрата газової фази $q = Q/(V_0 d^2)$.

Визначення розмірів кавітаційної каверни. Більшу частину досліджень кавітаційної каверни присвячено режимам штучної кавітації для безмежних рідин [3] та обмеженим рідинам – в основному за ступеня стиску 0,01...0,1 [4]. Зокрема, у праці [5] автор дослідив зміни параметрів кавітаційної каверни на режимах природної кавітації за ступенів стиску потоку 0,3...0,7, у праці [6] – на режимах штучної кавітації за 0,1...0,3.

Дослідження, проведені авторами для ступенів стиску 0,73...0,93, підтвердили висновки авторів праць [3, 5, 6] стосовно впливу основних модельних параметрів на геометричні розміри каверни.

У праці [5] запропоновано такі емпіричні рівняння для розрахунку довжини каверни на режимах природної кавітації:

для $d/D_0 = 0,025...0,500$; $Fr = 7,0...25,1$; $Re = (4,5...7,3) \cdot 10^5$; $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

$$L_1 = 0,1\chi^{-2}(d/D_0)^{1,25}Fr^{0,5}Re^{0,25}; \quad (2)$$

для $d/D_0 = 0,024...0,360$; $Fr = 9,5...15$; $Re = (1,2...1,6) \cdot 10^6$; $T_0 = 110...120 \text{ }^\circ\text{C}$

$$L_2 = 0,06\chi^{-2}(d/D_0)^{1,25}Fr^{0,5}Re^{0,25}(\Delta T/T_0)^{-0,25}. \quad (3)$$

Порівняння з результатами праць [6] і [7] свідчать, що в діапазонах $0 < \delta < 0,1$ і $0,1 < \delta < 0,5$ зміни відносної довжини каверни λ від основних модельних параметрів є ідентичними.

За нашими дослідженнями, подальше збільшення ступеня стиску на режимах штучної кавітації суттєво змінює ширину й довжину каверни, а також характер виносу газової фази.

У праці [5] одержано такі емпіричні залежності відносної довжини каверни від модельних параметрів на режимах штучної кавітації:

для $\delta = 0,7...0,8$; $\chi = 1,2...3,0$; $q = 0,02...1,20$; $Fr = 10...17$

$$\lambda = 15 \cdot 10^{-8} e^{24\delta} \chi^{-2,5} Fr^{0,81}; \quad (4)$$

для $\delta = 0,8...0,9$; $\chi = 1,2...5,0$; $Fr = 10...17$.

$$\lambda = 6,8 \cdot 10^{-8} e^{24\delta} \chi^{-2,5} Fr^{0,81}. \quad (5)$$

Відхилення експериментальних даних від розрахованих за рівняннями (4) і (5) не перевищує 10%. Порівняння цих рівнянь із наведеними в працях [3, 5, 6] свідчить, що показники степеня в них є приблизно рівними, а значення коефіцієнта суттєво різняться. Так, наприклад, у [6] він дорівнює 0,05, у [5] – 0,1.

На рис. 4 наведено залежності $\lambda = f(\chi, Fr)$ для ступенів стиску потоку 0,7...0,9 на режимі штучної кавітації, одержані одним з авторів. Порівняння цих даних із розрахунками за (4) і (5) свідчать, що відхилення не перевищує 14%.

Установлено, що зростання ступеня стиску потоку зміщує область робочих режимів у зону вищих чисел кавітації. Режим штучної кавітації в обмеженому потоці дозволяє здійснювати дослідження за ступенів стиску понад 0,73, тоді як за природних умов, коли $0,7 < \delta < 0,73$, спостерігається кавітація на стінках контактної камери й здійснювати дослідження є неможливим.

Візуальні спостереження свідчать, що на режимах штучної кавітації за витрати газової фази $q \geq 0,1$ майже зникають пульсації хвостової частини каверни. При цьому довжина каверни, що вентилюється, суттєво збільшується порівняно з довжиною каверни за цих же умов у разі відсутності вентиляції. Водночас рівень кавітаційного шуму зменшується. Тобто кавітація з вентиляванням повітрям стає «м'якою».

У разі штучної кавітації контактну камеру заповнено щільніше, поверхня кавітаційної каверни є стабільнішою й більшою, тобто є більшою площею поверхні масообміну між фазами.

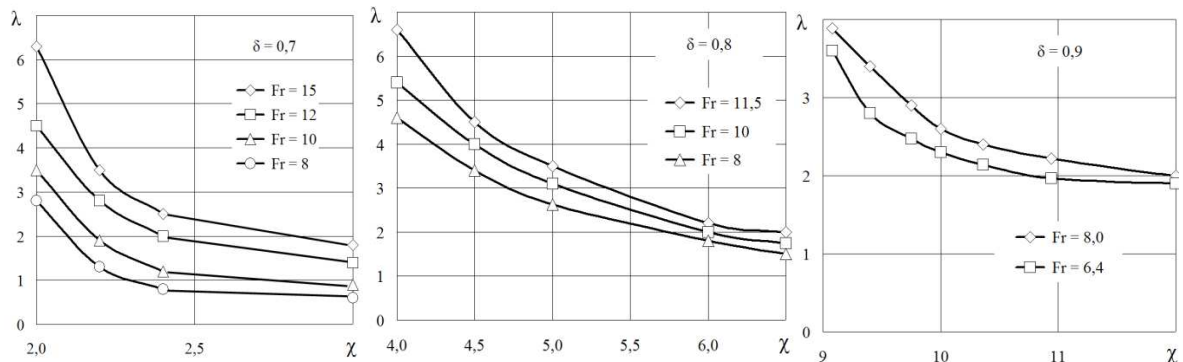


Рис. 4 – Залежності відносної довжини каверни від числа кавітації для різних ступенів стиску потоку і чисел Фруда

Мідель каверни за ступенів стиску 0,7...0,9 майже не змінюється за довжиною. Кавітаційна каверна займає весь переріз контактної камери, і її мідель дорівнює діаметру основи кавітатора незалежно від його форми. У розрахунках його можна взяти рівним діаметру основи кавітатора.

За ступеня стиску понад 0,7 каверна є циліндром із прозорою чи емульсійною поверхнею, повітря з якої евакуюється безперервними шнурами чи пульсаційно з її хвостової частини.

Для необмежених рідин за ступеня стиску менше 0,7 каверна вентилюється примусово від вентилятора, а для $\delta > 0,7$ спостерігається самозасмокування повітря, тобто вентилявання здійснюється ежектуванням.

Динаміка виносу газу з вентилюваних каверн. Практичний інтерес має також встановлення залежностей відносної витрати газової фази, що вентилює каверну, від чисел кавітації, Рейнольдса, Фруда й ступеня стиску потоку рідини, а також відносної довжини кавітаційної каверни від відносної витрати газової фази (рис. 5).

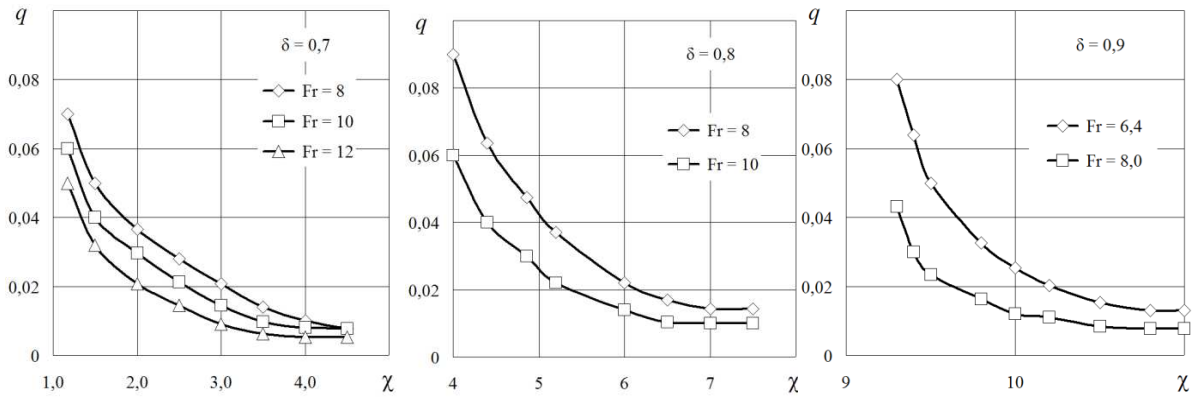


Рис. 5 – Залежності відносної витрати газової фази від числа кавітації для різних ступенів стиску потоку

Тиск P_k у каверні, що вентилюється газовою фазою, був завжди вищим, ніж тиск насиченої пари рідини, і змінювався від 13 до 50 кПа залежно від витрати газу, що засмоктувалася в каверну. Відносну витрату газової фази q визначали в діапазоні витрати 0,1...12 м³/год. При цьому швидкість на вході в контактну камеру змінювалась від 2,2 до 15 м/с.

Малі значення відносної витрати ($q = 0,05...0,08$) характеризувалися пульсаційним виносом газової фази з хвостової частини кавітаційної каверни. Збільшення витрати до 0,1 сприяє плавному переходу від пульсацій до безперервного виносу вихоровими шнурами.

На відміну від відповідних залежностей для необмеженої рідини [3], для обмеженого потоку L -подібна крива із зростанням ступеня стиску зміщується в бік вищих чисел кавітації за однакової витрати повітря, що вентилює каверну. Окрім того, підвищується чутливість системи контактна камера–кавітатор–каверна до зміни витрати газової фази. Це відображається в зміні відносної довжини каверни, оскільки її ширина в міделі залишається рівною діаметру основи кавітатора.

Найбільші значення відносної довжини одержано за ступеня стиску 0,9 ($q = idem$). Шляхом узагальнення експериментальних даних одержано емпіричне рівняння

$$q = 0,75\lambda^{2,8}\delta^{-3,8}Re^{-0,44}Fr^{0,1}, \quad (6)$$

справедливе для $q = 0,01...0,12$; $\lambda = 1,2...5,0$; $\delta = 0,7...0,9$; $Re = (2,5...4,9) \cdot 10^5$; $Fr = 8...17$.

Розбіжність між експериментальними даними й результатами розрахунку за формулою (6) не перевищує 1%.

Залежності відносної довжини каверни від відносної витрати газової фази, що вентилює каверну, одержані на основі розрахунку за формулою (13), наведено на рис. 6.

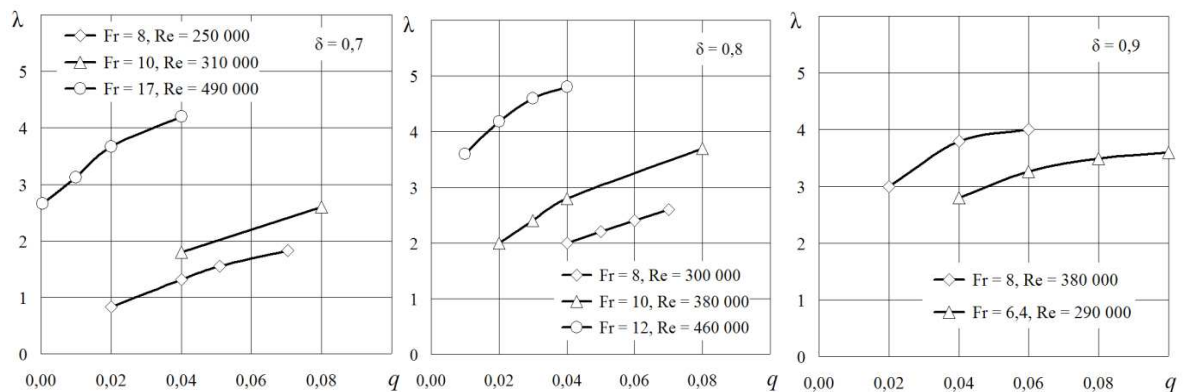


Рис. 6 – Залежності відносної довжини каверни від відносної витрати газової фази, що вентилює каверну, за різного ступеня стиску

Фотографування каверн в потоці (рис. 7) дозволило спостерігати динаміку виносу газової фази з каверни зі зміною витрати газової фази, що засмоктувалася, і швидкості рідкої фази в контактній камері.

Установлено, що штучна кавітація має таку динаміку. Початкова кавітація ($0,01 < q < 0,04$) характеризується появою за кавітатором окремих кавітаційних бульбашок та їх невеликих скупчень, які зносить потік рідини. Зростання відносної витрати газової фази до 0,05 веде до утворення за кавітатором емульсійної каверни з поверхнею, що має вигляд рідини, що інтенсивно кипить. Винос здійснюється ланцюгами повітряних і кавітаційних бульбашок.

Подальше зростання витрати газу ($0,05 < q < 0,08$) сприяє утворенню пульсаційного режиму, оскільки винос повітря з каверни дифузійно чи невеликим скупченнями бульбашок стає недостатнім. Хвостова частина каверни прагне утворити стаціонарний зворотний струмінь, що протидіє зростанню тиску в каверні

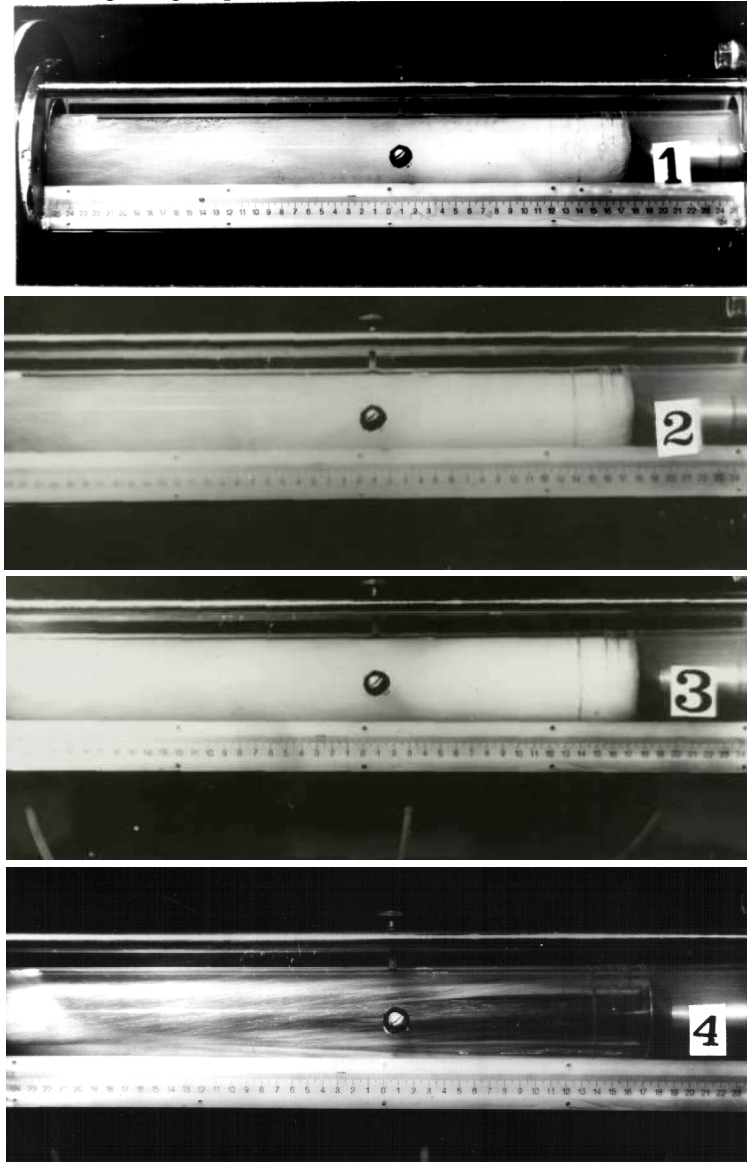
і сприяє накопиченню повітря в каверні до певного значення. Після його досягнення відбувається інтенсивна зміна довжини каверни й пульсаційний викид певної порції повітряних і кавітаційних бульбашок із хвостової частини каверни нестационарними вихорами. Частота пульсаційних викидів змінюється залежно від швидкості рідкої фази й витрати газової фази [8].

Режим безперервного виносу вихоровими шнурами спостерігається, коли $q > 0,08$. Поверхня каверни прозора, а хвостова частина заповнена піною, краплями рідини й кавітаційними бульбашками. Поверхня контакту фаз є максимальною. Винос газу здійснюється безперервно вихоровими шнурами з циркуляцією. На поверхні каверни спостерігаються «хвилі», вона ніби «омивається» рідиною за гвинтовою лінією. На відміну від течії в необмеженій рідині перехід від пульсацій до безперервного виносу відбувається плавно, без стрибків [3].

За значення ступеня стиску потоку 0,93, коли швидкість рідкої фази становить 7 м/с, можна спостерігати режим «замикання» труби.

Висновки. Визначено гідродинамічні характеристики кавітаторів в обмежених потоках на режимах штучної кавітації. Установлено, що: більшим значенням чисел Фруда за однакових чисел кавітації відповідає більша відносна довжина кавітаційної каверни; збільшення ступеня стиску потоку зміщує гідродинамічні характеристики в зону більших чисел кавітації; мідель каверни, що вентилюється, майже за всією довжиною дорівнює діаметру основи кавітатора незалежно від його форми; за ступенів стиску понад 0,7 на режимах штучної кавітації спостерігаються ефекти ежекції повітря й кавітації одночасно.

Найбільш прийнятними для конструювання кавітаторів є конструкції, в яких ступінь стиску становить 0,7...0,9 за таких режимних параметрів: $q = 0,01...0,12$; $\lambda = 1,2...5,0$; $Re = (2,5...4,9) \cdot 10^5$; $Fr = 8...17$.



1 – $\delta = 0,7$; 2 – $\delta = 0,8$; 3 – $\delta = 0,9$;
4 – $\delta = 0,8$ із розвинутою кавітацією і циркуляцією на поверхні каверни

Рис. 7 – Кавітаційні каверни за різних ступенів стиску

Список використаної літератури

1. *Перник А. Д.* Проблемы кавитации / А. Д. Перник. – Л. : Судостроение. 1966. – 439 с.
 1. *Кремлевский П. П.* Расходомеры и счетчики количества / П. П. Кремлевский. – Л. : Машиностр., 1975. – 776 с.
 2. *Кнэпп Р.* Кавитация / Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит. – М. : Мир, 1974. – 668 с.
 3. *Лапин В. А.* Экспериментальное исследование влияния стенок на основные размеры каверн за дисками, расположенными по оси круглой трубы / В. А. Лапин // Проектирование и мореходные качества промысловых судов : тр. КТИИПиХ МРХ СССР. – 1975. – Вып. 59. – С. 53-57.
 4. *Мачинский А. С.* Гидродинамические и теплообменные характеристики суперкавитационных испарительных аппаратов для обессоливания жидкостей : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – К., 1984. – 18 с.
 5. *Лапин В. А.* Экспериментальное исследование развитых кавитационных течений : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / В. А. Лапин. – Калининград, 1975. – 27 с.
 6. *Щербатенко Л. Е.* Влияние термодинамического эффекта на кавитацию в шнековых и центробежных насосах / Л. Е. Щербатенко, А. С. Шапиро // Хим. и нефтяное машиностр. – 1981. – № 8. – С. 17-20.
 7. *Федоткин И. М.* Гидродинамические характеристики вентилируемых каверн в ограниченных потоках / И. М. Федоткин, А. С. Мачинский, Н. А. Яхова // Хим. машиностр. : респ. межвед. научно-техн. сб. – 1990. – Вып. 51. – С. 58-64.
- Застосування кавітації в хімічній технології : у 2 ч. – Ч. 2. Ефективні кавітаційні засоби / Б. Б. Булгаков, В. І. Сівецький, Н. А. Яхова, О. Є. Колосов. – К. : НТУУ «КПІ», 2009. – 105 с.