

О.Г. Гусак, канд. техн. наук,  
О.І. Котенко, канд. техн. наук,  
Л.М. Ніколаєнко,  
С.О. Лугова, канд. техн. наук

Сумський державний університет, м. Суми, Україна

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРИ ЧИСЕЛЬНОМУ ДОСЛІДЖЕННІ ТА ФІЗИЧНОМУ ЕКСПЕРИМЕНТІ ВИНИКНЕННЯ ТА РОЗВИТКУ КАВІТАЦІЇ У ВІЛЬНОВИХРОВИХ НАСОСАХ

*Приводятся результаты численного расчета распределения скоростей и давления в проточной части свободновихревого насоса типа "Turo" при возникновении и развитии кавитации с помощью программного продукта Ansys CFX 11. На основе выполненных расчетов определены зоны изменения абсолютного давления и эпюры распределения абсолютной скорости, построена срывная кавитационная характеристика.*

*The article presents results of the numerical calculation of velocity and pressure distribution in the "Turo" type torque flow pump setting during cavitation onset and development using the Ansys CFX 11 software. Based on the preformed calculations are defined zone of change of the absolute pressure, the absolute velocity distribution diagram and stalling cavitation characteristic has been built.*

### Вступ

Для перекачування неочищених промислових та побутових стоків, напівфабрикатів у вигляді в'язких рідин, рідин з твердими частками та волокнистими включеннями, а також різних суспензій знаходять застосування вільновихрові насоси (СВН).

Конструктивна особливість насосів СВН полягає в наявності вільної камери (ВК) перед робочим колесом (РК). А розташування РК у циліндричній розточці корпусу (рис. 1) і вільний прохід основного потоку рідини через ВК дозволяє перекачувати насосом суміші з високою концентрацією твердих домішок без зміни основних параметрів і при високих кавітаційних властивостях.

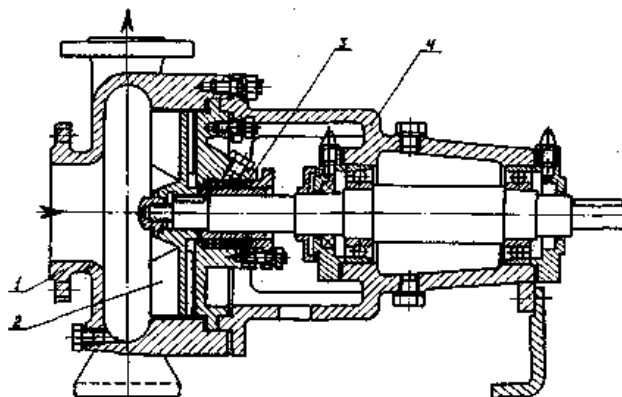


Рисунок 1 — Конструкція вільновихрового насоса типу Turo. 1 — корпус; 2 — робоче колесо; 3 — ущільнення кінцеве; 4 — корпус підшипників.

Вільновихрові насоси поступаються відцентровим насосам по економічності, але забезпечують надійну і довговічну роботу протягом всього періоду експлуатації.

При оцінці надійності роботи насосів особлива увага надається кавітаційним явищам. Можливість роботи без кавітації при збільшенні гідравлічного опору на вході в насос дозволяє підвищити концентрацію перекачуваного середовища, а більш пізній прояв наслідків кавітації зменшити глибину закладення фундаменту насосних установок. Все це зрештою веде до збільшення економічності використання насосів СВН [1].

Забезпечення надійної і довговічної роботи насосів вимагає знання кількісної оцінки ступеня розвитку кавітації, а також особливостей виникнення і розвитку кавітаційних явищ.

Дослідження кавітації в насосах проводиться, головним чином, на основі енергетичного способу дослідження. У цьому випадку кавітаційні характеристики будуються по зміні їх напірної та енергетичної характеристик. Задачею цих досліджень є визначення на зривній кавітаційній характеристиці насоса моменту зниження енергетичних параметрів, що вказує на вплив кавітації на робочий процес в насосі. Але кавітація виникає задовго до початку зміни вказаних характеристик. Визначити момент появи кавітації в насосі та встановити місце її виникнення за допомогою енергетичного способу неможливо. До того ж проведення фізичного експерименту пов'язано з великими матеріальними витратами при проведенні досліджень.

### Результати досліджень

Запропонований спосіб розрахункового дослідження процесу кавітації в СВН за допомогою програмного продукту ANSYS CFX11 [2]. Дослідження проводилися для СВН з робочим колесом напіввідкритого типу з 10 плоскими радіальними лопатями, які установлені з кутom нахилу 90°. Основні параметри насоса: подача  $Q=80\text{ м}^3/\text{год}$ , напір  $H=20\text{ м}$ .

Розрахункова область складається з двох елементів: вільної камери (ВК) — статорний елемент і робочого колеса (РК) — елемент, який обертається. Для кожного з елементів робочої області було побудовано неструктуровану розрахункову сітку. Для моделювання течії у пограничному шарі з достатньою точністю поблизу твердих стінок було виділено шар, який складався з призматичних комірок. В області ядра потоку для ВК та РК тетраедрична сітка. Загальне число елементів розрахункової сітки складає 2 700 000 комірок. Моделювання течії проводилося в стаціонарній постановці.

На початковому етапі був проведений розрахунок течії з умовами, які виключають появу кавітації. Даний розрахунок проводився для однофазного середовища з застосуванням стандартної  $k-\varepsilon$  моделі турбулентності. В робочій області між статорним і роторним елементами було задано 2 інтерфейси: на вході в РК і на виході з нього. Тип даних інтерфейсів був прийнятий “frozen rotor” (заморожений ротор), що припускає осереднення параметрів у часі. В якості граничних умов на вході до розрахункової області задавалась — масова витрата, а на виході — величина статичного тиску. Наступним етапом являвся розрахунок течії з моделлю кавітації. Граничні умови були змінені: на вході задавався статичний тиск, а на виході масова витрата. Розрахунок проводився в деякому діапазоні статичних тисків. Кожний наступний розрахунок проводився зі зниженням статичного тиску на вході з прийнятним інтервалом. В якості початкових наближень для першої точки використовувались дані розрахунку, виконаному в безкавітаційному режимі, для кожної наступної точки — попередніх. Це дало змогу отримати зривну кавітаційну характеристику при постійній витраті.

У результаті дослідження структури потоку в протічній частині СВН при безкавітаційному режимі роботи насоса було отримане розподілення абсолютної швидкості та тиску. На рисунку 2 показано результати розрахункового дослідження характеру розподілу абсолютної швидкості та тиску в міжлопатевих каналах РК насоса поблизу втулки та на периферії. Величина швидкості (рисунок 2, а) з тильного боку лопаті має більше значення, ніж з робочого боку, але до периферії швидкість зменшується до 0. З тильного боку лопаті тиск має менше значення, ніж з робочого, але в напрямку виходу потоку з РК тиск зростає до найбільших значень.

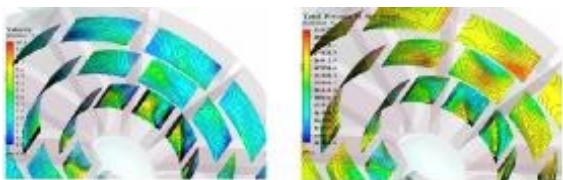


Рисунок 2 — Розподіл абсолютної швидкості та тиску в міжлопатевих каналах робочого колеса насоса

Для отримання більш детального уявлення про характер руху рідини у робочому колесі СВН було зроблено розрахунки в перерізах РК (рисунок 3) в площині ХУ: по кромках лопатей РК, на відстані 22 мм від входу в РК та поблизу основного диску.

На перерізі кромки лопатей РК (рисунок 3. а) зони малих швидкостей розташовані хаотично, а на периферії стає помітним збільшення швидкостей по периметру циліндричної розточки корпусу. Поблизу втулки (рисунок 3,б) вздовж потоку рідини зони малих абсолютних швидкостей збільшуються, але при цьому розподіл швидкостей в міжлопатевих каналах має приблизно однаковий характер.

На рисунку 3, в показано розподіл абсолютної швидкості поблизу основного диску робочого колеса. У даному випадку стає помітним поширення зони малих швидкостей вздовж всієї лопаті з її робочого боку і зони високих швидкостей з тильної сторони.

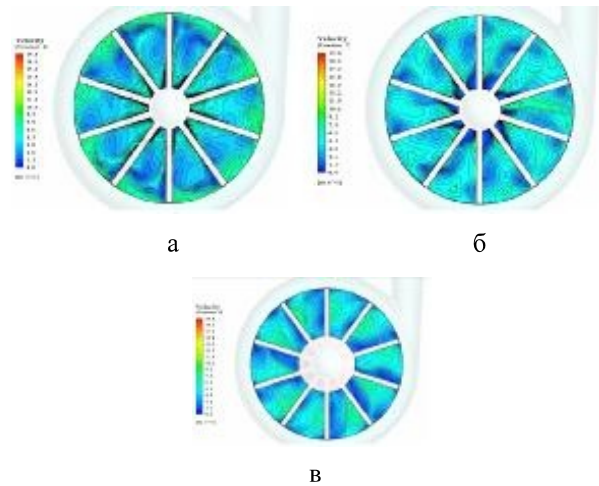


Рисунок 3 — Розподіл абсолютних швидкостей у перерізах РК

Для пояснення отриманих результатів розглянемо робочий процес насоса СВН [3].

Рідина зі всмоктувального патрубка надходить до робочого колеса в області втулки і під дією відцентрової сили спрямовується до периферії. Загальний потік рідини в насосі складається з потоку у ВК і потоку в РК. При виході потоку рідини з РК одна частина його з високим запасом енергії спрямовується до відводу, а друга частина втрачає запас енергії при взаємодії з потоком спливання у ВК і спрямовується у бік підводу. В результаті виникає меридіональний рух рідини або поздовжній вихор. Нерівномірний розподіл швидкостей у поздовжньому вихорі впливає на величину тиску в ВК та РК. Вказаний факт і є причиною нерівномірного розподілу абсолютної швидкості в міжлопатевих каналах РК вздовж напрямку руху рідини.

Наявність зони малих значень абсолютних швидкостей в області втулки пояснюється наявністю вихорової зони через відривне обтікання вхідних кромки РК або входу потоку рідини на більшому діаметрі.

На рисунку 4 показано характер зміни абсолютної швидкості у ВК насоса. Як і в РК, так і в ВК найбільші значення швидкостей відзначено на периферії протічної частини. По периметру ВК відбувається нерівномірний розподіл швидкостей. При цьому зони високих швидкостей розташовано симетрично. Це можна пояснити деформацією поздовжнього вихора в результаті впливу відводу насоса.

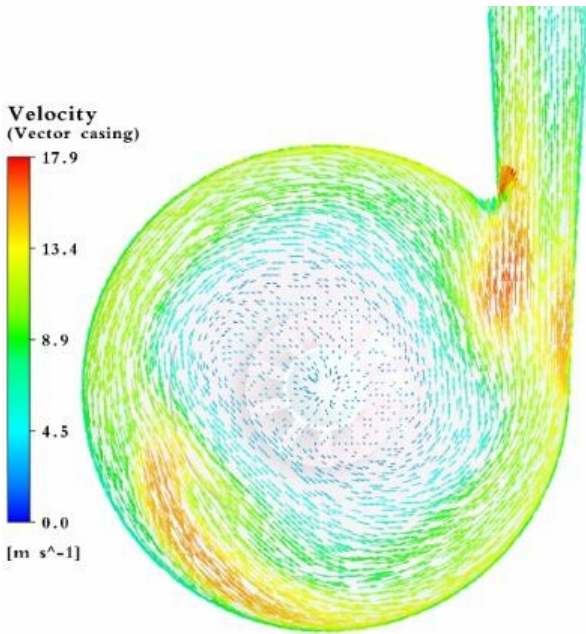


Рисунок 4 — Розподіл абсолютної швидкості у ВК

Основне завдання досліджень полягало в розрахунку двофазного середовища з моделлю кавітації. Вихідними даними були результати розрахунку однофазного середовища [4].

Дослідження кавітаційних явищ і розробка заходів по запобіганню кавітації або зняттю її наслідків є частиною загальної тенденції на енерго- і ресурсозбереження при розробці і експлуатації насосного устаткування. Кавітацію слід вважати одним з основних негативних наслідків, який перешкоджає нормальній роботі насоса. Для удосконалення конструкції насосів необхідно знати місця появи кавітації і причини їх виникнення.

У результаті розрахунку визначені зони виникнення та розвитку кавітації в протічній частині СВН при різних значеннях кавітаційного запасу, а також отримано зривну кавітаційну характеристику.

При кавітаційному запасі, що становить  $NPSH=8$  м, на тильному боці лопаті поблизу втулки РК помітні кавітаційні бульбашки (рисунок 5).

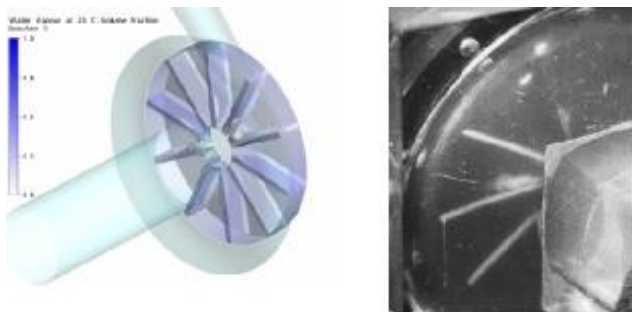


Рисунок 5 — Области кавітації при  $NPSH=8$  м

Утворення кавітаційної зони пояснюється місцевим падінням тиску, внаслідок недосконалого обтікання вхідної кромки. При цьому області скупчень бульбашок не утворюють безперервну кавітаційну зону. Бульбашки періодично відриваються від поверхні лопаті та зникають у міжлопатевих каналах РК. Розмір бульбашок залежить від концентрації паронасиченої рідини.

Схожість процесу утворення кавітації при чисельному розрахунку та фізичному експерименті (рисунок 6) спостерігається для другої точки, в якій кавітаційний запас становить  $NPSH=6,3$  м. Кавітаційні бульбашки тут більш чіткі. При цьому напір насоса практично не змінився. На цьому режимі скупчення кавітаційних бульбашок з тильного боку лопаті поширюється вздовж неї.

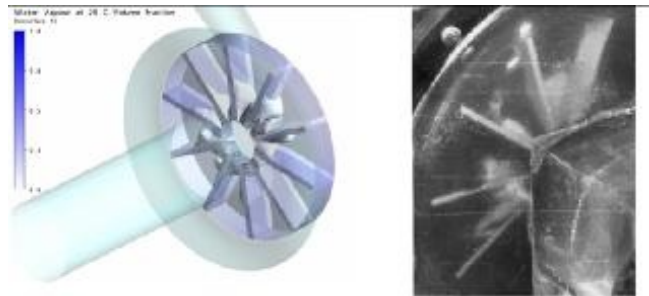


Рисунок 6 — Области кавітації при  $NPSH=6,3$  м

У третій точці, при  $NPSH=4$  м на вході в РК в області мінімуму тиску стає чітко видимою границя, вниз по потоку від якої з тильного боку лопаті РК переміщуються кавітаційні бульбашки. Частина з них потрапляє до міжлопатевих каналів, а друга частина змивається потоком до ВК. Відмінним є поява щільної кавітації в зазорі між торцями лопатей на зовнішньому діаметрі та циліндричною розточкою корпуса насоса. На відміну від чисельного розрахунку при кавітаційних випробуваннях СВН у всмоктувальному патрубку утворюється ще одна кавітаційна область, яка переміщується до вільної камери насоса (рисунок 7).

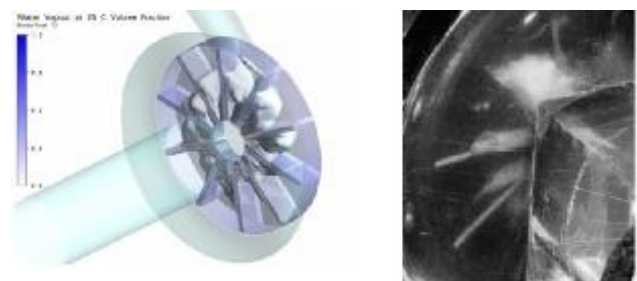


Рисунок 7 — Области кавітації при  $NPSH=4$  м

При подальшому зниженні тиску на вході в насос при  $NPSH=3,7$  м область кавітації на вході в РК поширюється вниз по потоку (рис 8). З появою цієї області стійкої кавітаційної зони збільшується опір потоку, що набігає. Живий переріз активного потоку зменшується, а його швидкість збільшується. До того ж парорідинні бульбашки, що відірвалися від каверни, досягають виходу із РК. Це викликає зміну параметрів потоку. Цим можна пояснити зни-

ження напору насоса. А при фізичному експерименті кавітація посилюється на вході до вільної камери та в області язика відводу.

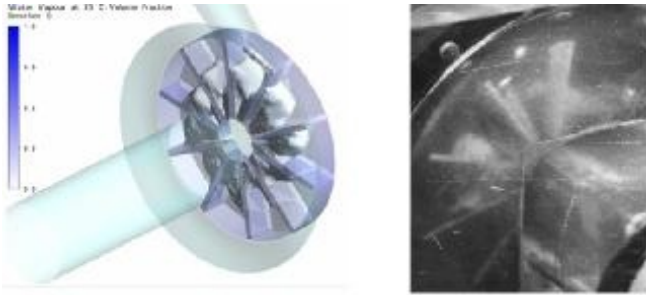


Рисунок 8 — Области кавітації при  $NPSH=3,7$  м

При кавітаційному запасі  $NPSH=3,1$  м посилюється прояв зазначених зон кавітації (рисунок 9). Але на відміну від фізичного експерименту при чисельному розрахунку не спостерігається розповсюдження кавітаційної зони у вільній камері насоса навіть при падінні параметрів.

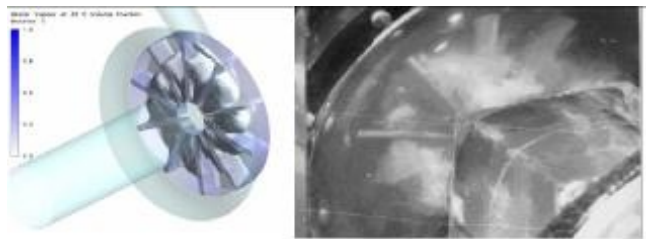


Рисунок 9 — Области кавітації при  $NPSH=3,1$  м

В точці 6 кавітаційний запас становить  $NPSH=1$  м. Цей випадок характеризується посиленням прояву зазначених зон кавітації (рисунок 10). Як і при фізичному експерименті в цій точці починає спостерігатися розповсюдження кавітаційної зони в вільну камеру насоса. Кавітаційна зона майже повністю заповнила міжлопатевий канал, але перекачування рідини продовжується.

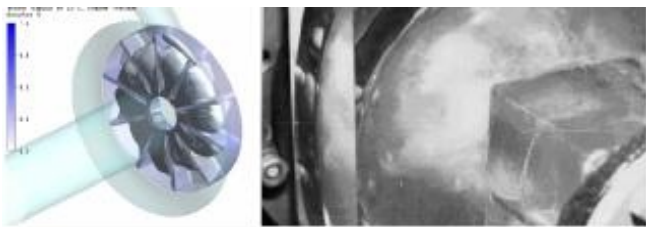


Рисунок 10 — Области кавітації при  $NPSH=1,5$  м

За результатами досліджень робочого процесу вільновихрового насоса можна представити наближену картину течії рідини у вільній камері і робочому колесі при виникненні та розвитку кавітації (рисунок 11). Зони виникнення кавітації у СВН мають визначене місце. Розташування їх залежить від багатьох факторів, до яких у першу чергу слід віднести режими роботи та умови всмоктування рідини, також співвідношення геометричних розмірів проточної частини насоса [1].

Аналізуючи отриманий розподіл абсолютної швидкості та тиску в міжлопатевих каналах робочого колеса можна зробити висновок: кавітація у СВН починається з тильного боку лопаті РК поблизу втулки. На першій стадії процесу відбувається стиснення потоку на вході до РК, в результаті чого швидкість потоку збільшується, а тиск відповідно знижується. Після стиснення перерізу відбувається розширення потоку: кінетична енергія падає, частково перетворюється в енергію тиску та розсіюється під дією дисипативних сил. При розширенні кавітаційної зони на вході до РК потік рідини із вхідного патрубка спрямовується до міжлопатевих каналів. Процес стиснення і розширення потоку повторюється. При підвищенні тиску після стиснення перерізу відбувається захоплення кавітаційних бульбашок у міжлопатевих каналах РК або в ВК.

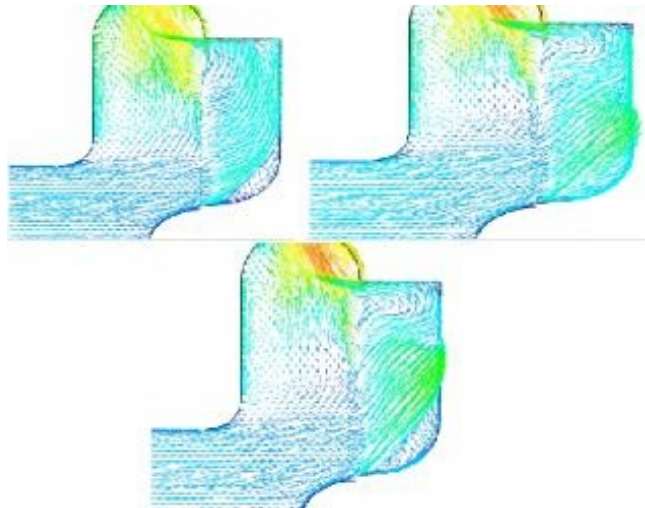


Рисунок 11 — Розподіл абсолютної швидкості у РК та ВК: при появі кавітації; перед 3% падінням напору насоса; при розвинутій кавітації

За результатами чисельного розрахунку була побудована зривна кавітаційна характеристика вільновихрового насоса (рисунок 12).

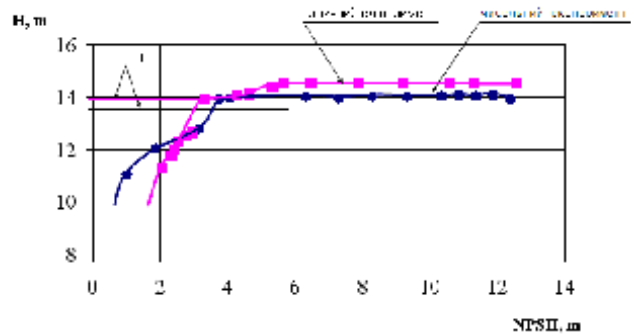


Рисунок 12 — Зривна кавітаційна характеристика вільновихрового насоса

При зниженні тиску на вході в насос процес кавітації в проточній частині починається раніше, ніж відбувається зрив режиму роботи насоса. Після досягнення певного

розміру кавітаційної зони напір насоса зменшиться порівняно з початковим його значенням, але різкого падіння не відбувається. І тільки після розповсюдження кавітаційної зони по проточній частині напір плавно зменшується. У СВН різкого зриву параметрів не відбувається, що є їх перевагою при використанні.

При зниженні тиску на вході в насос, внаслідок виникнення та розвитку кавітації, відбувається зміна параметрів насоса. Зрив параметрів роботи насоса відбувається при значно розвинутій кавітації.

На рисунку 12 показано зривну кавітаційну характеристику вільновихрового насоса. Такий характер кривої визваний зміною умов передачі енергії від робочого колеса до спливаючого потоку. Після того, як тиск на вході до робочого колеса досягає тиску насиченої пари з тильного боку лопаті біля втулки робочого колеса з'являється кавітаційна зона. У подальшому область з тиском, який дорівнює тиску насиченої пари перекачуваної рідини, поступово поширюється вздовж лопаті та по ширині міжлопатевих каналів (рисунки 13).

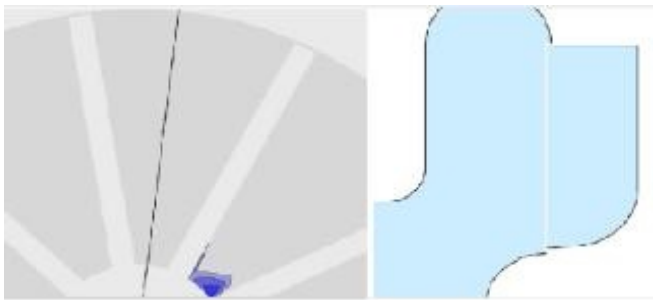


Рисунок 13 — Розвиток кавітаційної зони у робочому колесі ВВН

У залежності від стадії розвитку кавітації змінюється радіус входу потоку до робочого колеса. При збільшенні зони низького тиску передача енергії потоку відбувається ділянками лопатей колеса, в яких тиск більше, ніж тиск насиченої пари (рисунки 14).



Рисунок 14 Розвиток кавітаційної зони в робочому колесі СВН

Після розповсюдження тиску насиченої пари по всьому міжлопатевому каналу відбувається зрив параметрів насоса (рисунки 15).

Кавітаційні явища в інших місцях (в області з'єднання вхідного патрубку з вільною камерою насоса, в області язика відводу та щільна кавітація на виході робочого ко-

леса) помітного впливу на зрив параметрів, а відповідно і на всмоктувальну здатність насоса не мають. Їх вплив проявляється тільки як вплив таких шкідливих факторів кавітації, як шум, вібрація та кавітаційна ерозія елементів проточної частини насоса.



Рисунок 15 — Розвиток кавітаційної зони у робочому колесі СВН

### Висновки

- 1) отриманий взаємозв'язок між картиною течії рідини та початком виникнення і розвитку кавітації;
- 2) епюри розподілення тиску і абсолютної швидкості у міжлопатевих каналах дозволяють прогнозувати імовірні зони виникнення початкової кавітації;
- 3) кавітація зароджується в РК з тильного боку лопаті поблизу втулки;
- 4) визначені області виникнення кавітації у СВН із РК типу Туро;
- 5) кавітація у СВН існує задовго до зриву його параметрів;
- 6) розміри каверн не є однаковими у всіх міжлопатевих каналах через різне їх положення відносно відводу насоса;
- 7) зрив роботи насоса є наслідком поширення кавітації по ширині міжлопатевих каналів і поширення кавітаційних бульбашок вільною камерою.

### Література

1. Котенко, А.И. Оценка кавитационных качеств свободновихревых насосов / А.И. Котенко, В.Ф. Герман // Вісник СумДУ — 2008. — №2. — С. 81 — 84.
2. ANSYS CFX 10.0 Solver Models. Release 10.0 [Електронний ресурс]. — 2008. — 549р. — Режим доступу: <http://www.ansys.com>.
3. Герман, В.Ф. Исследование структуры потока в свободновихревом насосе // Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты: теория, расчет, конструирование: темат. сб. научн. трудов. — К.: ИСИО, 1994. — С. 67—81.
4. Proceedings of the 4th international meeting on Cavitation and dynamic problems in hydraulic machinery and systems IAHR-WG 2011 / edited by: A. Gajic, M. Benisek, M. Nedeljkovic / The computational model of the emergence and development of cavitation in torque flow pump / A. Kotenko, L. Nikolayenko, S. Lugova — Belgrade: University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, 2011. — P.87 — 94.

Надійшла 5.10.2012 року