

где p - давление, Па; \vec{g} - ускорение свободного падения, м/с²; ρ - плотность смеси, кг/м³; μ - динамическая вязкость смеси, Па·с.

Уравнение энергии запишем в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\vec{v}h) = \nabla \cdot [\lambda(\nabla T)] + S_h, \quad (3)$$

где h - энтальпия смеси, Дж/кг; λ - коэффициент теплопроводности смеси, Вт/м·К; C_p - удельная теплоемкость, Дж/кг·К.

Свойства смеси (плотность, динамическая вязкость и т.д.) определяются по формуле:

$$\alpha = \sum_i Y_i \alpha_i, \quad (4)$$

где α_i - i -го компонента смеси.

Полагаем, что поток массы при конденсации пара зависит от диффузии пара из потока паровоздушной смеси к поверхности конденсации:

$$\dot{m}_{cond} = \rho D \frac{1}{1 - Y_v} \frac{\partial Y_v}{\partial x} \quad (5)$$

где D - коэффициент диффузии, м²/с.

Массовая доля пара определяется по формуле:

$$Y_v = \frac{\omega}{1 + \omega}, \quad (6)$$

где ω - удельная влажность, которую можно найти из выражения:

$$\omega = \frac{0.622 P_v}{P - P_v} \quad (7)$$

где $P_v = P_v(T)$ - давление насыщенного пара, как функция температуры.

Тепловой поток от газовой смеси к пленке конденсата запишется в виде:

$$q'' = \dot{m}_{cond} h_{fg} + \lambda \frac{dT}{dx} \quad (8)$$

где h_{fg} - скрытая теплота, Вт.

Список литературы:

1. *Saraireh M.* Heat transfer and condensation of water vapour from humid air in compact heat exchangers: PhD Thesis 2012 [Электронный ресурс] / M. Saraireh. – Victoria University, Melbourne, Australia. – Режим доступа: http://vuir.vu.edu.au/21316/1/Mohammad_Saraireh.pdf
2. *Puneta M., Khandekar S.* A CFD based modeling approach for predicting steam condensation in the presence of non-condensable gases [Текст] / M. Puneta, S. Khandekar. – Nuclear Engineering and Design, Vol. 324. – 2017. – 280-296 p.
3. *Mamyoda, T., Asano, K.* (1994). Experimental study of condensation of vapors in the presence of noncondensable gas on a short horizontal tube. / G. M. Evans. – JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN, 27(4), 485–491p

УДК 532.528.1

Коноваленко В.О.

Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КАВІТАЦІЇ В ГІДРАВЛІЧНИХ СИСТЕМАХ

Робота присвячена розгляду проблеми утворення процесу кавітації в гідроприводі літальних апаратів та можливих методах чисельного моделювання даного процесу на етапах проектування гідравлічної системи. В

роботі розглянуті причини виникнення кавітації, основні місця утворення кавітаційних каверн та математичний апарат для створення чисельних моделей. Показані результати чисельного експерименту моделювання процесу виникнення кавітаційних каверн в кавітаційному соплі в двовимірній постановці задачі за допомогою сучасних CFD-комплексів.

Ключові слова: кавітація, кавітаційна каверна, тиск насиченої пари, гідравлічні системи, сопло.

Кавітація – це процес утворення в середині рідини порожнин, заповнених газом, парою або їх сумішшю (кавітаційних каверн), тобто порушення суцільності рідини. Виникає внаслідок місцевого зниження тиску в рідині до певного критичного значення $p_{кр}$ (в реальній рідині значення $p_{кр}$ близьке до тиску насиченої пари цієї рідини при даній температурі), що може відбуватися або при збільшенні швидкості рідини (гідродинамічна кавітація), або при проходженні акустичної хвилі великої інтенсивності під час півперіоду розрідження (акустична кавітація) [1].

Оскільки в реальній рідині завжди присутні дрібні каверни пари або газу, то, при русі їх з потоком при потраплянні в зону тиску $p < p_{кр}$, вони втрачають стійкість й починають збільшуватись у розмірах. Після переходу у зону підвищеного тиску й вичерпання кінетичної енергії рідини в умовах розширення ріст каверни припиняється і вона починає зменшуватись. Якщо каверна містить достатньо багато газу, то після досягнення нею мінімального радіуса вона відновлюється у розмірах й здійснює декілька циклів загасаючих коливань, а якщо газу мало, то захоплюється повністю у першому періоді. Отже, поблизу обтічного тіла (наприклад, в трубі з місцевим звуженням) створюється досить чітко обмежена «кавітаційна зона», заповнена рухомими кавернами.

Дослідження кавітаційних процесів на різних ділянках гідроприводу є актуальною задачею технічних розрахунків при проектуванні гідравлічних систем. Найбільш характерні зони показані на рис. 1.

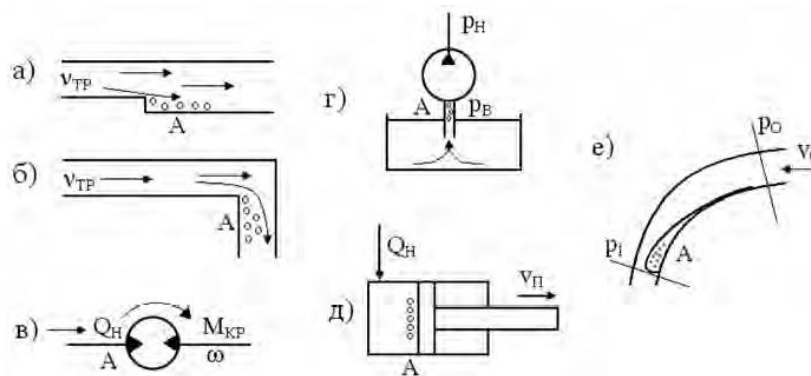


Рис. 1 – Найбільш характерні зони виникнення кавітації в гідроприводі:

а) виступ в гідролінії; б) пряме коліно; в) гідромотор при попутному навантаженні; г) всмоктуюча камера насоса; д) гідроциліндр при попутному навантаженні; е) крутий вигин трубопроводу.

В теперішній час для дослідження процесу кавітації можна використовувати чисельне моделювання за допомогою сучасних CFD-комплексів, наприклад, ANSYS FLUENT [2]. Сучасні CFD-комплекси дозволяють будувати так звані «віртуальні стенди» для дослідження і оптимізації параметрів виробів. Використання CFD-моделей дозволяє значно зекономити час і засоби при аналізі чутливості, проробки різноманітних концептуальних проектів і дозволяє відібрати найбільш перспективні проекти.

В даній роботі представлені результати чисельного моделювання процесу кавітації в кавітаційному соплі (Рис. 2.). Розглядалась двовимірна постановка задачі з вхідним тиском

рівним 50 атм і вихідним в 5 атм. Використовувалась двопараметрична модель турбулентності SST $k - \epsilon$ та модель кавітації Schnerr-Sauer.

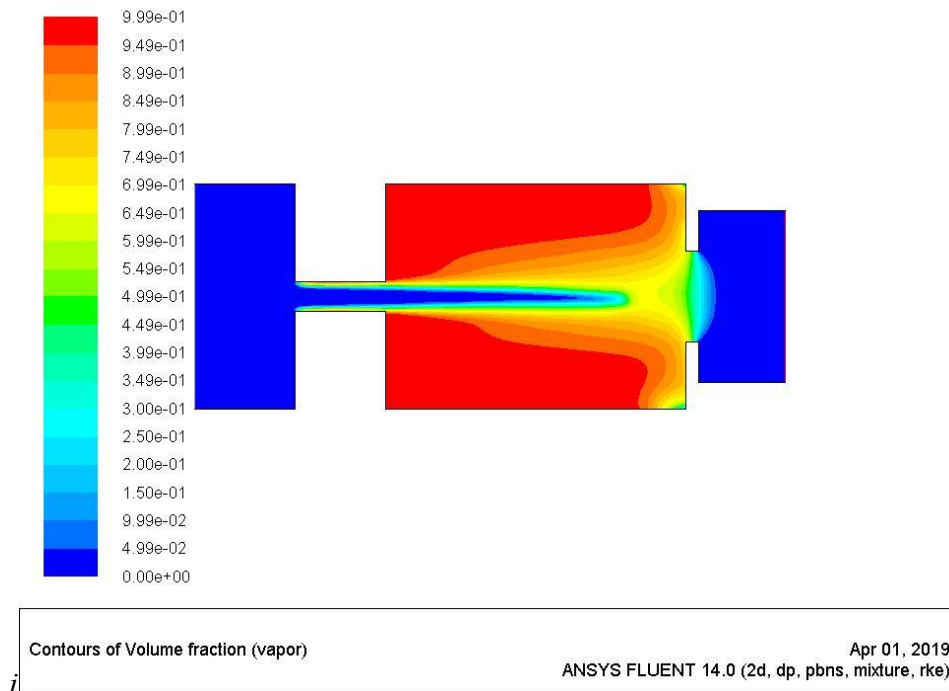


Рис. 2 – Частка фракції «пар» при чисельному моделюванні кавітації.

Результат дослідження передусім підтверджує принципіальну можливість оптимізації дослідження процесу кавітації за рахунок чисельних експериментів. Крім того, показано, що існує можливість вибору більш економного, з точки зору обчислювальних ресурсів, підходу до чисельного рішення, який забезпечує в більшості випадків допустиму точність розрахунків.

Список використаних джерел

1. Кавітація. Фізичні, хімічні, біологічні та технологічні аспекти / Шевчук Л. І., Старчевський В. Л. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014. — 376 с.
2. Воронин Г.И. Системы кондиционирования воздуха на летательных аппаратах / Г.И. Воронин. – М.: Машиностроение, 1973. – 444 с.
2. ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide. April 2009. ANSYS Inc.

УДК 519.6:533.6

Сохацький А.В., д.т.н., проф.

Інститут транспортних систем та технологій НАН України

ВИБІР МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТІ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІКИ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

Складна стохастична природа турбулентних течій ускладнює процес їх вивчення. Фізичне та математичне моделювання таких течій є надзвичайно складним, як фізичної так і з математичної точки зору. Розглядаються проблеми моделювання течій, що базуються на використанні осереднених рівнянь Нав'є-Стокса в формі Рейнольдса. Проведено аналіз моделей турбулентності. Числові розрахунки турбулентних течій підтверджують вибір комбінованої RANS - LES моделі для розрахунку аеродинаміки транспортного апарата.

Ключові слова: Чисельне моделювання, рівняння Нав'є-Стокса, турбулентна течія, моделі турбулентності, аеродинаміка транспортних апаратів.