УДК 536.242

CFD АНАЛІЗ ТЕПЛОВІДДАЧІ НАДКРИТИЧНОЇ ВОДИ В УМОВАХ ЗМІШАНОЇ КОНВЕКЦІЇ

Фіалко Н.М.^{1,2}, член-кореспондент НАН України, **Носовський А.В.²**, член-кореспондент НАН України, **Шеренковський Ю.В.¹**, канд. техн. наук, **Меранова Н.О.¹**, канд. техн. наук, **Шараєвський І.Г.²**, докт. техн. наук, **Піоро І.Л.³**, докт. техн. наук

¹ Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, м. Київ, 03057, Україна

² Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України, вул. Лисогорська, 12, м. Київ, 03028, Україна

³ Faculty of Energy Systems and Nuclear Science University of Ontario Institute of Technology 2000 Simcoe Str. N., Oshawa ON L1K 7K4 Canada

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.01>

Представлено результати комп'ютерного моделювання закономірностей теплообміну надкритичної води, пов'язані з впливом поля сил тяжіння.

Представлены результаты компьютерного моделирования закономерностей теплообмена сверхкритической воды, связанные с влиянием поля сил тяжести.

The results of computer modeling of heat transfer regularities of supercritical water, associated with the influence of the field of gravity, are presented.

Бібл. 15, рис. 5.

Ключові слова: надкритична вода, CFD моделювання, змішана конвекція.

D – внутрішній діаметр, м;
 G – масова швидкість, кг/(м²с);
 L – нагрівана довжина труби, м;
 P – тиск, МПа;
 q – густина теплового потоку на стінці труби, кВт/м²;
 r – радіальна координата, м;
 T – температура, °С;
 x – осьова координата, м;
 α – коефіцієнт тепловіддачі.

Нижні індекси і скорочення:

вх – вхідний;
 пк – псевдокритичний (pseudocritical);
 р – середньомасовий;
 ст – стінка;
 CFD – (Computational Fluid Dynamics) розрахункова гідродинаміка.

Вступ

При надкритичних тисках теплоносія в діапазоні температур, що включають псевдокритичну температуру, сили плавучості, як відомо, значно інтенсивніше впливають на теплообмін, ніж при параметрах, близьких до нормальних. Дана особливість теплообміну при надкритичних тисках пов'язана з екстремальною зміною густини теплоносія, що призводить до появи яскраво вираженого локального максимуму коефіцієнта об'ємного розширення поблизу псевдокритичної точки [1-4]. Вказане зумовлює актуальність проведення спеціальних досліджень теплообміну при надкритичних тисках, спрямованих на виявлення ролі термогравітації. При цьому як інструмент таких досліджень на особливу увагу заслуговує CFD моделювання [5-15].

Мета і постановка завдань досліджень

Метою роботи було встановлення закономірностей впливу термогравітації на теплообмін при висхідній течії надкритичної води у вертикальних гладких трубах. Значна увага приділялася аналізу особливостей даного впливу, пов'язаних з деформацією радіальних профілів температури по довжині каналу, зниженням коефіцієнтів тепловіддачі α та рухом фронту псевдофа-

зового переходу. При цьому вказаний аналіз проводився при зміні у відносно широких межах густини теплового потоку на стінці труби.

Фізична постановка задачі, що розглядається, відповідає вісесиметричній задачі змішаної конвекції в умовах суттєвої залежності теплофізичних властивостей від температури. Для реалізації гідродинамічної стабілізації течії на вході в канал перед ним встановлювалась ненагрівана ділянка довжиною 1,2 м. Особливості математичної моделі досліджуваного процесу і методи комп'ютерного моделювання наведено в [11].

В табл. 1 подаються значення основних параметрів для різних варіантів CFD моделювання.

В усіх розрахункових варіантах внутрішній діаметр труби D і її довжини L були незмінними: $D = 10$ мм; $L = 4$ м.

Результати досліджень

На рис. 1 представлена зміна уздовж ділянки труби, що обігривається, величин коефіцієнта тепловіддачі α і температури стінки $T_{ст}$, отриманих з урахуванням і без урахування архимедових сил. Згідно з наведеними даними коефіцієнти тепловіддачі, що відповідають наявності вказаного врахування, є нижчими по всій

Табл. 1. Значення параметрів, які використовуються при CFD моделюванні

Варіант	G , кг/м ² с	q , кВт/м ²	$P_{\text{вх}}$, МПа	$T_{\text{вх}}$, °С
1	496	239	24	323
2	496	263	24	323
3	494	287	24,2	325
4	496	310	24	323

Рис. 1. Розподіл коефіцієнта тепловіддачі і температури стінки труби уздовж її осі з урахуванням (ліній 1, 3) і без урахування (ліній 2, 4) сил плавучості для варіантів розрахунків 1 та 4.

довжині труби. Причому відносні розбіжності в величинах α в разі наявності та відсутності врахування архимедових сил виявляються в цілому більш значними при високих q . Наприклад, ці розбіжності досягають 21 % при $q = 310$ кВт/м² і 11 % при $q = 239$ кВт/м².

Зниження тепловіддачі в разі дії сил плавучості пов'язано з деяким загасанням турбулентного переносу поблизу стінки, яке тим суттєвіше, чим вище густина підведеного теплового потоку q .

Характер зміни по довжині каналу величин коефіцієнта тепловіддачі, отриманих з урахуванням і без урахування сил плавучості, якісно аналогічний. Хоча в разі, коли береться до уваги дія зазначених сил, положення екстремумів на кривих $\alpha = f(x)$ дещо зміщується в область менших значень x .

Рисунок 2 ілюструє радіальні профілі температури за наявності і відсутності врахування сил плавучості. Як видно, для всіх представлених поперечних перерізів труби, окрім $x = 4,0$ м (де температури, що зіставляються, практично збігаються), має місце однаковий характер співвідношення температур для порівнюваних ситуацій. А саме, температури, що відповідають наявності врахування сил плавучості, виявляються вищими поблизу стінки труби і більш низькими поблизу її осі. При цьому відмінності порівнюваних температур по довжині труби

в цілому зростають, досягають максимуму і потім зменшуються, стаючи нехтовно малими. Підвищені рівні температур поблизу стінки труби зумовлені загасанням турбулентного переносу, пов'язаним з природною конвекцією. Зважаючи на це відведення теплоти до ядра потоку виявляється утрудненим і температури тут є більш низькими, ніж за відсутності природної конвекції.

Рисунок 3 ілюструє зміну коефіцієнта тепловіддачі α , температур $T_{\text{ст}}$ і $T_{\text{р}}$ по довжині труби для різних значень q (варіанти 1-4). Як видно, з підвищенням q суттєво знижуються коефіцієнти тепловіддачі, помітно зростають температури стінки труби при відносно невеликому збільшенні температури $T_{\text{р}}$. Так, значення коефіцієнта тепловіддачі можуть знижуватися в 1,7 рази при збільшенні теплового потоку, що підводиться, від 239 до 310 кВт/м². При цьому розбіжності за температурами стінки не перевищують 32 °С, а за температурами $T_{\text{р}}$ - 8 °С.

Профілі температури в різних поперечних перерізах каналу при різних значеннях густини теплового потоку, що підводиться, наведено на рис. 4. Як свідчать представлені дані, при відносно високих значеннях q ($q = 287$ кВт/м² і $q = 310$ кВт/м²) має місце складний характер впливу густини теплового потоку, що підводиться, на профілі температури по радіусу труби. Так,

Рис. 2. Профілі температури в радіальному напрямку на різних відстані від вхідного перерізу труби з урахуванням (лінії 1, 3) і без урахування (лінії 2, 4) сил плавучості для варіантів розрахунків 1 та 4.

Рис. 3. Розподіл коефіцієнта тепловіддачі α , температури стінки труби $T_{ст}$ і температури флюїду T_p уздовж осі труби для варіантів розрахунку 1 - 4.

більшим значенням q в фіксованому поперечному перерізі труби можуть відповідати як вищі, так і нижчі температури поблизу стінки труби і на її осі в залежності від місця розташування даного перерізу. Для низьких же значень q ($q = 239 \text{ кВт/м}^2$ і $q = 263 \text{ кВт/м}^2$) у всіх поперечних перерізах каналу температури тим вищі, чим більше значення q . Описана картина співвідношення температур, що відповідають різним значенням густини теплового потоку, при відносно високих значеннях q , очевидно, пов'язана з зазначеним вище більш суттєвим проявом впливу сил плавучості за даних умов.

На рис. 5 наведено конфігурації фронту псевдофазового переходу для різних значень q за наявності і відсутності врахування архимедових сил. Даний фронт рухається від стінки труби і для всіх розглянутих ситуацій досягає її осі. При цьому, чим більше значення q , тим раніше фронт псевдофазового переходу досягає осі труби. Ця закономірність справедлива як у випадку

врахування сил плавучості, так і при його відсутності. При всіх величинах q значення поздовжньої координати, що відповідає положенню фронту на осі труби, виявляється меншим за відсутності врахування сил плавучості. Поблизу стінки труби картина руху фронту псевдофазового переходу з урахуванням і без урахування сил плавучості відрізняється від такої в ядрі потоку. А саме, якщо в ядрі потоку при врахуванні сил плавучості даний фронт рухається повільніше, то поблизу стінки навпаки швидше, ніж за відсутності даного врахування.

Висновки

1. На основі застосування FLUENT коду виконано моделювання змішаної конвекції при висхідній течії надкритичної води у вертикальних трубах та встановлено ефекти впливу термогравітації на характеристики теплообміну.

Рис. 4. Профілі температури в радіальному напрямку на різній відстані від вхідного перерізу труби для варіантів розрахунку 1-4.

Рис. 5. Конфігурація руху фронту псевдофазового переходу, визначена за температурою $T_{нк}$ з урахуванням (лінії 1-4) і без урахування (лінії 5-8) впливу сил плавучості для різних варіантів розрахунку: лінії 1, 5 – варіант 1; лінії 2, 6 – варіант 2; лінії 3, 7 – варіант 3; лінії 4, 8 – варіант 4.

2. Проведено зіставлення CFD передбачень за коефіцієнтами тепловіддачі і температурами внутрішньої поверхні стінки труби, отриманими з урахуванням і без урахування сил плавучості. Показано, зокрема, що коефіцієнти тепловіддачі, які відповідають відсутності даного урахування виявляються нижчими по всій довжині труби. При цьому відносні розбіжності величин α , які зіставляються, зростають з підвищенням значень підведеного теплового потоку.

3. Виконано аналіз впливу сил плавучості на конфігурацію радіальних профілів температури надкритичної води. Встановлено, що для всіх розглянутих значень q у всіх поперечних перерізах труби, крім перерізів, що знаходяться в безпосередній близькості до вихідного, температури, отримані з урахуванням сил плавучості, є вищими біля стінки труби і нижчими в ядрі потоку.

4. Отримано дані про закономірності руху фронту псевдофазового переходу в умовах наявності і відсутності врахування сил плавучості. Встановлено, що в ситуаціях, які зіставляються, швидкість руху даного фронту відрізняється поблизу стінки труби і в ядрі потоку: при врахуванні сил плавучості фронт псевдофазового переходу в ядрі потоку рухається повільніше, а поблизу стінки труби – навпаки швидше.

ЛІТЕРАТУРА

1. Петухов Б.С., Поляков А.Ф. Теплообмен при смешанной турбулентной конвекции. Москва: Наука. 1986. 191 с.

2. Pioro I., Duffey R., Heat Transfer and Hydraulic Resistance at Supercritical Pressures in Power Engineering Applications. New York. NY. USA. ASME Press. 2007. 334 pages.

3. Фіалко Н.М., Пиоро И.Л., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Алешико С.А. CFD моделювання теплообміну при течії води надкритичних параметрів у вертикальних гладких трубах. Промышленная теплотехника. 2018. №1. С.12-20.

4. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Алешико С.А., Власенко Т.С., Шараевский И.Г., Зимин Л.Б., Стрижеус С.Н., Хміль Д.П. Особенности изменения теплофизических свойств сверхкритической воды при течении в круглых обогреваемых трубах. Науковий вісник НЛТУ України. 2018. Т.28.№3. С.117 – 121.

5. Abdulah R., Malin M., Agranat V., Pioro I. CFD Prediction of Mixed-Convection Heat Transfer in Supercritical Water in a Bare Tube. Proceeding of the 23th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 23). May 17-21. 2015. Chiba. Japan. Paper #1108. 10p.

6. Фіалко Н.М., Пиоро И.Л., Шеренковский Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Шараевский И.Г. Влияние теплового потока на стенке канала и давления воды на характеристики течения и теплообмена в гладких трубах при сверхкритических параметрах. Промышленная теплотехника 2016. №5. С. 5-13.

7. Фіалко Н.М., Пиоро И.Л., Майсон Н.В., Меранова Н.О. Моделирование течения и теплообмена в гладких трубах при сверхкритических давлениях. Промышленная теплотехника. 2016. №3. С. 10-17.

8. Zvorykina A., Fialko N., Stryzheus S., Khmil D., Pioro I. CFD Analysis of Supercritical Water Flow and Heat Transfer in Vertical Bare Tubes. Proceeding of the 26th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 26) London. England. 2018. Paper #81045. 13p.

9. Фіалко Н.М., Пиоро И.Л., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Шараевский И.Г. Влияние массовой скорости потока на характеристики течения и теплообмена в гладких трубах при сверхкритических параметрах. Промышленная теплотехника. 2016. №4. С. 5-13.

10. Farah A., Harvel G., Pioro I. Assessment of Fluent CFD Code as an Analysis Tool for Supercritical-Water Heat-Transfer Applications. Proceeding of the 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermohydraulics (NURETH -15). May 17-21. 2013. Pisa. Italy. Paper #118. 13p.

11. Фіалко Н.М., Носовський А.В., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Шараевський І.Г., Пиоро І.Л. Особливості течії надкритичної води в умовах змішаної конвекції. Промислова теплотехніка. 2018. №3. С.12-19.

12. Yang J., Oka Y., Ishiwatari Y., Liu J., Yoo J. Numerical Investigation of Heat Transfer in Upward of Supercritical Water in Circular Tubes and Tight Fuel Rod

Bundles. Nuclear Engineering and Design. 2007. V. 237. P. 420-430.

13. Zvorykin A., Fialko N., Meranova N., Alioshko S., Maison N., Voitenko A., Pioro I. Computer Simulation of Flow and Heat Transfer in Bare Tubes at Supercritical parameters. Proceeding of the 24th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 24). June 26-30. 2016. Charlotte. NC USA. Paper #60390. 12p.

14. Shang Z. CFD Investigations of vertical rod bundles of supercritical water-cooled nuclear reactor. Nuclear Engineering and Design. 2009. V. 239. P. 2562-2572.

15. Zvorykin A., Fialko N., Sherenkovskiy Ju., Alioshko S., Meranova N., Hanzha M., Bashkir I., Stryzheus S., Voitenko A., Pioro I. CFD Study on Specifics of Flow and Heat Transfer in Vertical Bare Tubes Cooled with Water at Supercritical pressure. Proceeding of the 25th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 25). July 2-6. 2017. Shanghai. China. Paper #68528. 11p.

CFD ANALYSIS OF THE HEAT TRANSFER OF SUPERCRITICAL WATER UNDER CONDITIONS OF MIXED CONVECTION

Fialko N.M.¹, Nosovskiy V.A.², Sherenkovskiy Ju.V.¹, Meranova N.O.¹, Sharaevskiy I.G.², Pioro I.L.³

¹ Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Zhelyabova str., Kyiv, 03680, Ukraine

² Institute of Nuclear Safety Problems, National Academy of Sciences of Ukraine, 12, Lysogorskaya str., Kyiv, 03028, Ukraine

³ Faculty of Energy Systems and Nuclear Science University of Ontario Institute of Technology 2000 Simcoe Str. N., Oshawa ON L1K 7K4 Canada

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.01>

The results of computer modeling of heat exchange supercritical water, associated with the influence of gravity, are presented. CFD prediction data on heat transfer coefficients and temperatures of the inside surface of the tube wall, obtained with and without buoyancy, are presented.

An interpretation of these predictions, which is associated with the turbulent transfer extinction near the tube wall in the case of buoyancy forces, is given. The analysis of the influence of buoyancy forces on the configuration of the radial temperature profiles of supercritical water was performed. The data on the regularities of motion of the pseudo-phase transition front in the presence and absence of accounting for buoyancy forces have been obtained.

Reference 15, figure 5.

Keywords: supercritical water, CFD simulation, mixed convection.

1. Petukhov B.S., Polyakov A.F. Heat transfer with mixed turbulent convection. Moscow: Science. 1986. 191 p. (in Rus).

2. Pioro I., Duffey R., Heat Transfer and Hydraulic Resistance at Supercritical Pressures in Power Engineering Applications. ASME Press. New York. NY. USA. 2007. 334 p.

3. Fialko N.M., Pioro I.L., Prokopov V.G., Sherenkovskiy Yu.V., Meranova N.O., Alioshko S.A. CFD Modeling of Heat Transfer under Flow of Supercritical

Parameters Water in Vertical Bare Tubes. Industrial Heat Engineering. 2018. № 1. P. 12-20. (in Ukr) <https://>

4. *Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovskiy Yu.V., Meranova N.O., Alioshko S.A., Vlasenko T.S., Sharaevskiy I.G., Zimin L.B., Stryzheus S.N., Khmil D.P.* Specifics of Changes of the Thermophysical Properties of Supercritical Water at the Flow in Round Heated Tubes. Scientific Bulletin of UNFU. 2018. V.28. №3. P.117 - 121. (in Rus).

5. *Abdulah R., Malin M., Agranat V., Pioro I. C* FD Prediction of Mixed-Convection Heat Transfer in Supercritical Water in a Bare Tube. Proceeding of the 23th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 23). May 17-21. 2015. Chiba. Japan. Paper #1108. 10p.

6. *Fialko N.M., Pioro I.L., Sherenkovskiy Yu.V., Maison N.V., Meranova N.O., Sharaevskiy I.G.* Effects of Heat Flux in the Channel Wall and Water Pressure on the Characteristics of Flow and Heat Transfer in Bare Tubes at Supercritical Parameters. Industrial Heat Engineering. 2016. №5. P. 5-13. (in Rus). <https://>

7. *Fialko N.M., Pioro I.L., Mayson N.V., Meranova N.O.* Simulation of Flow and Heat Transfer in Bare Tubes at Supercritical Pressures. Industrial Heat Engineering. 2016. №3. P. 10-17. (in Rus).

<https://>

8. *Zvorykina A., Fialko N., Stryzheus S., Khmil D., Pioro I.* CFD Analysis of Supercritical Water Flow and Heat Transfer in Vertical Bare Tubes. Proceeding of the 26th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 26) London. England. 2018. Paper #81045. 13p.

9. *Fialko N.M., Pioro I.L., Mayson N.V., Meranova N.O., Sharaevskiy I.G.* Effect of Mass Flux on Flow Characteristic and Heat Transfer in Bare Tubes at Supercritical Parameters. Industrial Heat Engineering. 2016. №4. P. 5-13. (in Rus). <https://>

10. *Farah A., Harvel G., Pioro I.* Assessment of Fluent CFD Code as an Analysis Tool for Supercritical-Water Heat-Transfer Applications. Proceeding of the 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermohydraulics (NURETH -15). May 17-21. 2013. Pisa. Italy. Paper #118. 13p.

11. *Fialko N.M., Nosovskiy A.V., Sherenkovskiy Ju.V., Meranova N.O., Sharaevskiy I.G., Pioro I.L.* Specifics of the flow of supercritical water under conditions of mixed convection. Industrial Heat Engineering. 2018. №3. P.12-19. (in Ukr). <https://>

12. *Yang J., Oka Y., Ishiwatari Y., Liu J., Yoo J.* Numerical Investigation of Heat Transfer in Upward of Supercritical Water in Circular Tubes and Tight Fuel Rod Bundles. Nuclear Engineering and Design. 2007. V. 237. P. 420-430.

13. *Zvorykin A., Fialko N., Meranova N., Alioshko S., Maison N., Voitenko A., Pioro I.* Computer Simulation of Flow and Heat Transfer in Bare Tubes at Supercritical Parameters. Proceeding of the 24th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 24). June 26-30. 2016. Charlotte. NC USA. Paper #60390. 12p.

14. *Shang Z.* CFD Investigations of Vertical Rod Bundles of Supercritical Water-Cooled Nuclear Reactor. Nuclear Engineering and Design. 2009. V. 239. P. 2562-2572.

15. *Zvorykin A., Fialko N., Sherenkovskiy Ju., Alioshko S., Meranova N., Hanzha M., Bashkir I., Stryzheus S., Voitenko A., Pioro I.* CFD Study on Specifics of Flow and Heat Transfer in Vertical Bare Tubes Cooled with Water at Supercritical Pressure. Proceeding of the 25th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 25). July 2-6. 2017. Shanghai. China. Paper #68528. 11p.

Отримано 20.11.2018

Received 20.11.2018