

УДК 536.242

ОСОБЛИВОСТІ ТЕЧІЇ 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.3.2018.02>

Наведено дані CFD аналізу закономірностей течії в умовах змішаної конвекції в гладких трубах, охолоджуваних водою при надкритичних тисках. Представлено результати зіставлення CFD передбачень, що відповідають наявності і відсутності врахування сил плавучості. Досліджено ефекти впливу даних сил, пов'язаних з затуханням турбулентного переносу, деформацією радіальних профілів осевої швидкості тощо.

Приведены данные CFD анализа закономерностей течения в условиях смешанной конвекции в гладких трубах, охлаждаемых водой при сверхкритических давлениях. Представлены результаты сопоставления CFD предсказаний, соответствующие наличию и отсутствию учета сил плавучести. Исследованы эффекты влияния данных сил, связанные с затуханием турбулентного переноса, деформацией радиальных профилей осевой скорости и т.п.

The data of the CFD analysis of the flow regularities under conditions of mixed convection in bare tubes cooled by water at supercritical pressures are given. The results of comparison of CFD predictions, corresponding to the presence and absence of accounting for the buoyancy forces, are presented. Effects of the influence of these forces on the damping of turbulent transport, deformation of radial profiles of axial velocity, and the other are investigated.

Бібл. 13, рис. 6.

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

D – внутрішній діаметр, м;

G – масова швидкість, кг/(м²с);

g – прискорення земного тяжіння, м/с²;

L – нагрівана довжина труби, м;

P – тиск, МПа;

q – густина теплового потоку на стінці труби, кВт/м²;

r – радіальна координата, м;

$$Ri^x \text{ – число Річардсона, } Ri^x = \frac{\left(1 - \frac{\rho^x}{\rho_{ax}}\right) g D}{(V^x)^2};$$

T – температура, °С;

Tu – інтенсивність турбулентності, %;

V – осеова швидкість, м/с;

V^x – середнє значення швидкості у перерізі каналу, м/с;

x – осеова координата, м;

Δx – протяжність по довжині каналу зони з М-подібним профілем швидкості, м;

ρ – густина, кг/м³;

ρ_{ax} – густина, що відповідає вхідній температурі рідини, кг/м³;

ρ^x – середнє значення густини рідини у перерізі каналу, кг/м³.

Нижні індекси і скорочення:

vx – вхідний;

pc – псевдокритичний (pseudocritical);

CFD – (Computational Fluid Dynamics) розрахункова гідродинаміка.

Вступ

Незважаючи на наявні досягнення в галузі атомної енергетики, кращі сучасні блоки ВВЕР-1000 забезпечують суттєво нижчі значення ККД нетто у порівнянні з передовими тепловими електростанціями. Це значною мірою зумовлено підвищенням початкових параметрів пари і освоєнням області надкритичних тисків на теплових електростанціях. В атомній енергетиці останнім часом також приділяється певна увага аналізу можливостей переходу на надкритичні параметри.

Науковий супровід такого переходу пов'язаний з вирішенням цілого ряду проблем реакторної теплофізики. Так, значний інтерес становить моделювання

течії і теплообміну надкритичної води стосовно ядерних установок. При цьому перспективним є комп'ютерне прогнозування характеристик вказаних процесів на основі CFD досліджень [1 - 12].

Мета роботи і постановка завдань досліджень

Мета роботи полягає у дослідженні на основі CFD моделювання закономірностей висхідної течії надкритичної води у вертикальних гладких трубах за умов, коли внесок природної конвекції є суттєвим.

Ставилось завдання зіставлення результатів CFD моделювання, одержаних з врахуванням і без врахування архімедових сил. В завдання роботи входило також встановлення ефектів впливу сил плавучості на

закономірності течії надкритичної води при варіюванні величини густини теплового потоку q на стінці труби. При цьому дослідженню, зокрема, підлягали особливості дії даних сил на характеристики турбулентного переносу.

Щодо фізичної постановки задачі, яка розглядається, то розв'язувалась вісесиметрична задача змішаної конвекції, що відповідає наявності вимушеного і вільного руху надкритичної води. Гідродинамічна стабілізація течії на вході в канал забезпечувалась за рахунок встановлення перед ним ненагріваної ділянки довжиною 1,2 м (рис.1). На вході в трубу задавалась постійна величина масової швидкості G , тиску P_{ex} і температури T_{ex} . На виході з труби приймалися м'які граничні умови. По довжині нагріваної ділянки труби задавались постійні значення густини теплового потоку, що підводиться до стінки.

Математичне моделювання проводилося при таких неварійованих вихідних даних: внутрішній діаметр труби $D = 0,01$ м; довжина нагріваної ділянки труби $L = 4,0$ м; інтенсивність турбулентності на вході в трубу $Tu_{ex} = 3\%$.

Нижче наводяться результати розрахунків для чотирьох варіантів CFD моделювання. Перший з них відповідає таким вихідним параметрам: $q = 239$ кВт/м²; $G = 496$ кг/(м²·с); $P_{ex} = 24,0$ МПа; $T_{ex} = 323$ °С; другий – $q = 263$ кВт/м²; $G = 496$ кг/(м²·с); $P_{ex} = 24,0$ МПа; $T_{ex} = 323$ °С; третій – $q = 287$ кВт/м²; $G = 494$ кг/(м²·с); $P_{ex} = 24,2$ МПа; $T_{ex} = 325$ °С; четвертий – $q = 310$ кВт/м²; $G = 496$ кг/(м²·с); $P_{ex} = 24,0$ МПа; $T_{ex} = 323$ °С.

Основні особливості методики моделювання фізичної ситуації, що досліджується, наведено в [13].

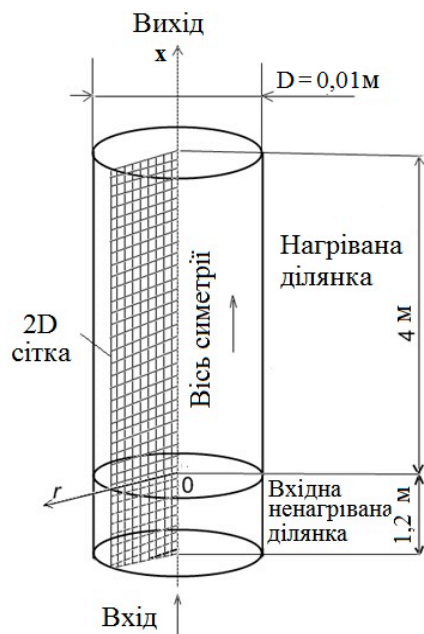


Рис. 1. До постановки задачі.

Результати досліджень та їх аналіз

Нижче наводяться результати CFD моделювання, що стосуються насамперед ефектів прояву природної конвекції, зумовленої дією архімедових сил. На рис. 2 представлено профілі аксіальної швидкості V_x у радіальному напрямку на різній відстані від входу в нагрівану ділянку труби при різних величинах q . Щодо форми цих профілів, яка певною мірою є індикатором наявності вільного руху теплоносія, то вона змінюється вздовж довжини труби таким чином. На початковій і вихідній ділянках труби (різних за протяжністю для різних значень густини теплового потоку q , що підводиться до стінки) дані профілі являють собою усічені параболи, властиві режиму вимушеної течії теплоносія в каналах. З віддаленням від початкової ділянки труби, в її центральній частині профілі швидкості деформуються, на них з'являється м'який локальний максимум поблизу стінки труби, який розмивається в міру наближення до вихідного перерізу каналу. Таким чином, М-подібний профіль швидкості, характерний для режиму змішаної конвекції, що відповідає наявності вимушеного і вільного руху надкритичної води, спостерігається лише на певній центральній по довжині ділянці труби.

Одержані дані свідчать, що локалізація по довжині труби зон з М-подібним профілем швидкості суттєво залежить від величини теплового потоку q . Так, координати поперечних перерізів каналу, що відповідають початку даної зони, для варіантів розрахунку 1 – 4 становлять: 2,24 м; 1,65 м; 1,23 м і 1,01 м. Тобто, чим більше значення q , тим вище за потоком починається зона з М-подібним профілем швидкості. Щодо координат перерізів, в яких ця зона закінчується, то для вказаних варіантів моделювання вони дорівнюють 3,47 м; 3,38 м; 3,26 м; і 3,15 м. Таким чином, із зростанням теплового потоку q зона наявності М-подібного профілю закінчується ближче до вхідного перерізу каналу. Однак, згідно з наведеними даними, величина q більш суттєво впливає на положення початку даної зони, ніж на її закінчення.

Звертає на себе увагу також той факт, що протяжність Δx по довжині каналу зони з М-подібним профілем помітно зростає з підвищенням теплового потоку q . Так для варіантів розрахунку 1 – 4, що відповідають різним значенням q , ця протяжність становить 1,23 м; 1,73 м; 2,03 м і 2,14 м.

Щодо локального максимуму на М-подібному профілі швидкості, то, як свідчать одержані дані, він виражений тим яскравіше, чим більша величина q . При цьому для всіх значень q місце розташування даного максимуму змінюється по довжині труби. А саме, цей максимум виникає на деякому віддаленні від стінки труби, далі вниз по потоку зміщується у напрямку до стінки і знову віддаляється від неї, розмиваючись.

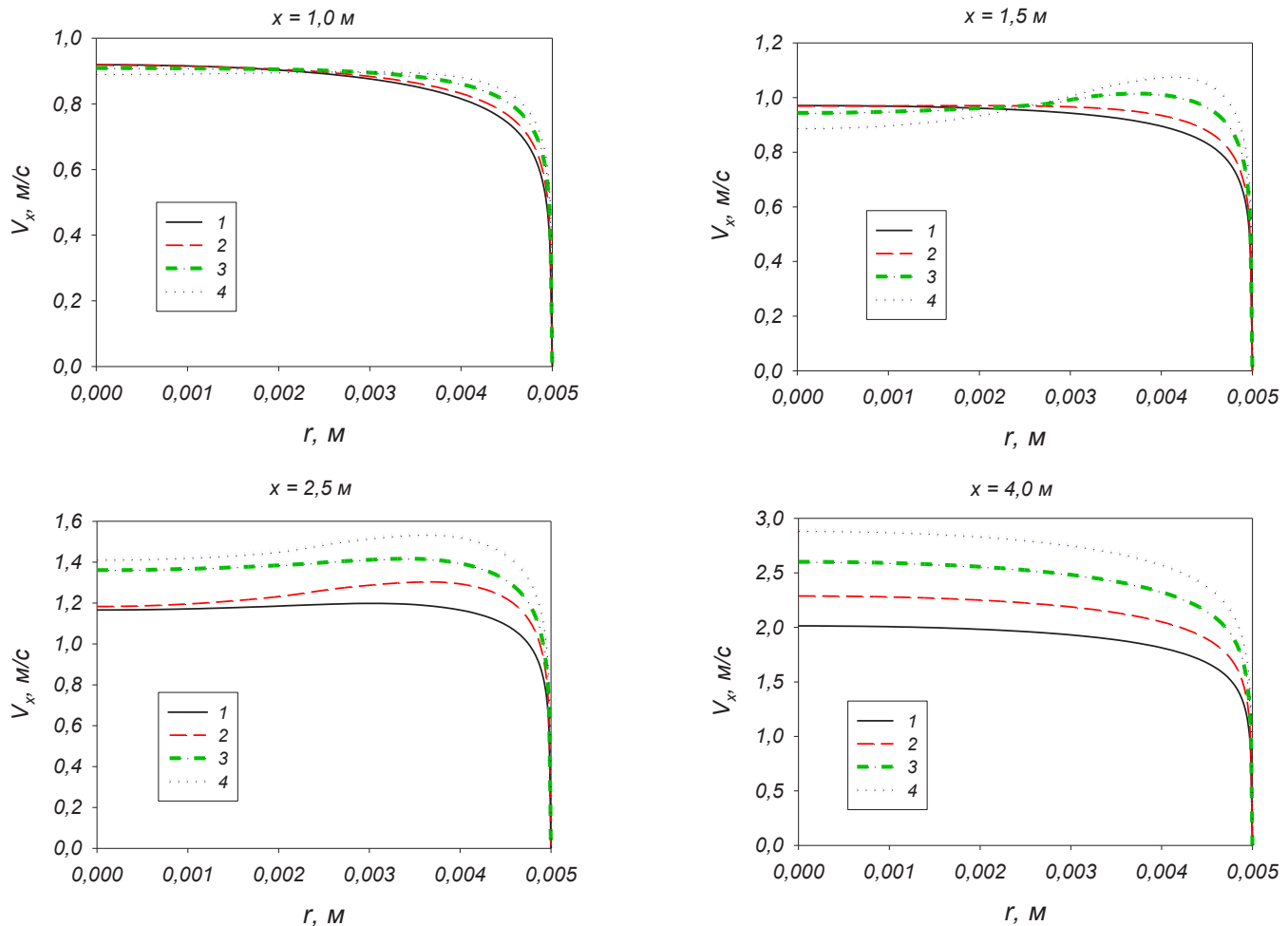


Рис. 2. Профілі осьової швидкості вздовж радіусу труби на різних відстані x від вхідного перерізу для варіантів розрахунків 1 - 4.

Рисунок 3 ілюструє результати розв'язку задачі, що розглядається, з врахуванням і без врахування дії архімедових сил. За відсутності цього врахування профілі швидкості є, як відомо, монотонними. Якщо ж беруться до уваги сили плавучості, то, як вже зазначалося, дані профілі залишаються монотонними на початковій нагріваній ділянці труби. Причому безпосередньо поблизу входу в трубу профілі, що відповідають наявності і відсутності сил плавучості, практично співпадають. Тобто тут вплив сил плавучості на формування профілів швидкості є нехтовно малим. Далі вниз по потоку має місце ділянка труби, на якій профілі швидкості, одержані з врахуванням сил плавучості, залишаються монотонними, дещо деформуються у порівнянні з профілями, що відповідають відсутності врахування даних сил. А саме у зіставленні з останніми профілі стають більш заповненими, тобто поблизу стінки швидкість дещо підвищується, а в ядрі течії – знижується. При подальшому русі рідини ці профілі набувають М-подібної форми, і кількісні розбіжності значень швидкості для

ситуацій з врахуванням і без врахування архімедових сил у цілому зростають. Далі локальні екстремуми швидкості розмиваються, профілі стають монотонними і практично співпадають з профілями швидкості, що відповідають відсутності врахування сил гравітації. Таким чином, згідно з одержаними даними в умовах, які розглядаються, має місце локальний по довжині труби прояв помітного впливу сили тяжіння на картину течії надкритичної води.

Описаний ефект локалізації впливу сил тяжіння корелюється певним чином з характером зміни по довжині

труби локального числа Річардсона: $Ri^x = \frac{\left(1 - \frac{\rho^x}{\rho_{ax}}\right) gD}{(V^x)^2}$.

Як видно з рис. 4, залежність $Ri^x = f(x)$ має екстремальний характер з яскраво вираженим максимумом у центральній по довжині ділянці труби. Збільшення числа Річардсона, як відомо, свідчить про посилення впливу сил плавучості на теплогідрравлічні характеристики

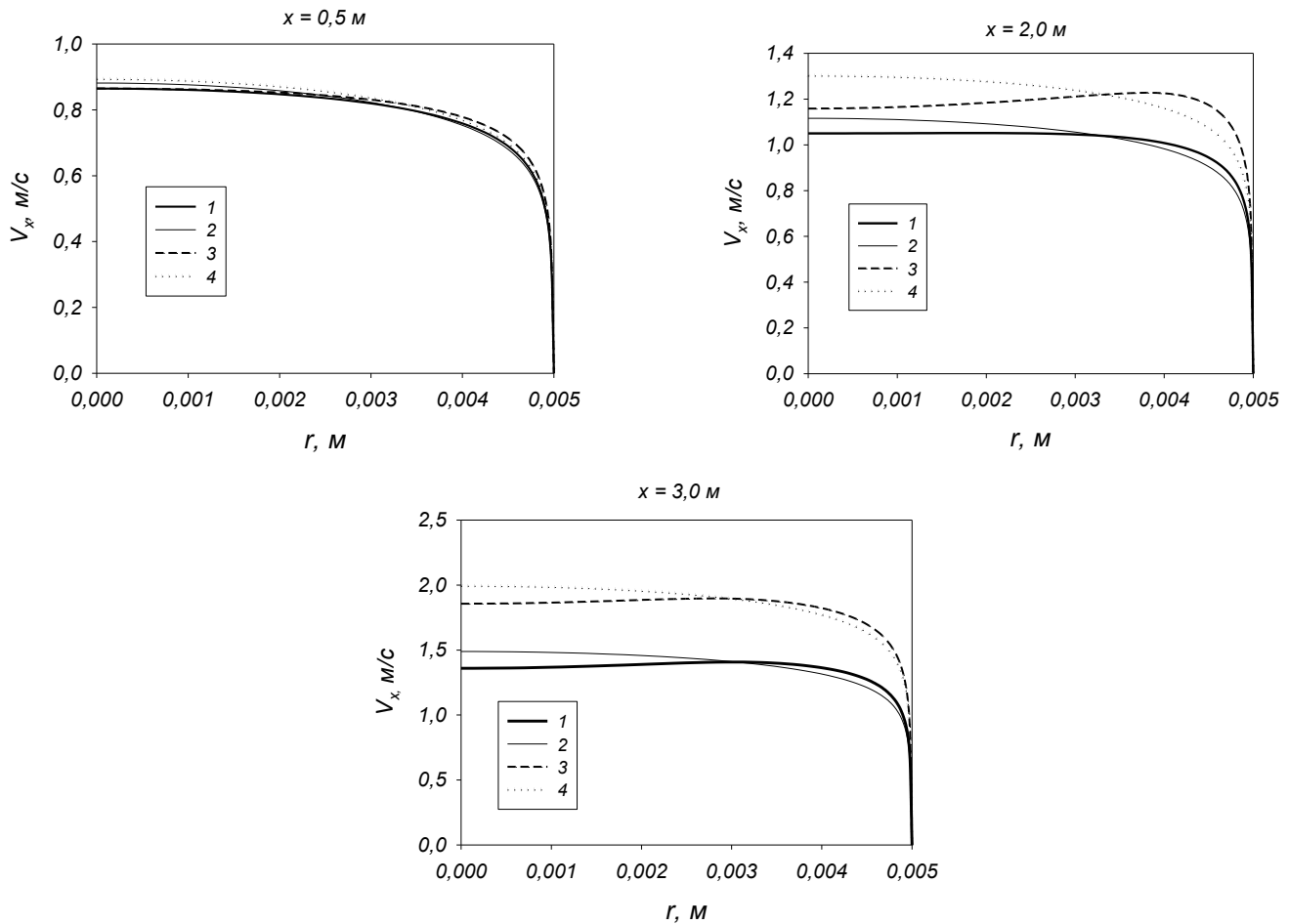


Рис. 3. Профілі осьової швидкості вздовж радіусу труби на різній відстані від вхідного перерізу з урахуванням (лінії 1, 3) і без урахування (лінії 2, 4) сил плавучості для варіантів розрахунків 1 (лінії 1, 2) та 4 (лінії 3, 4).

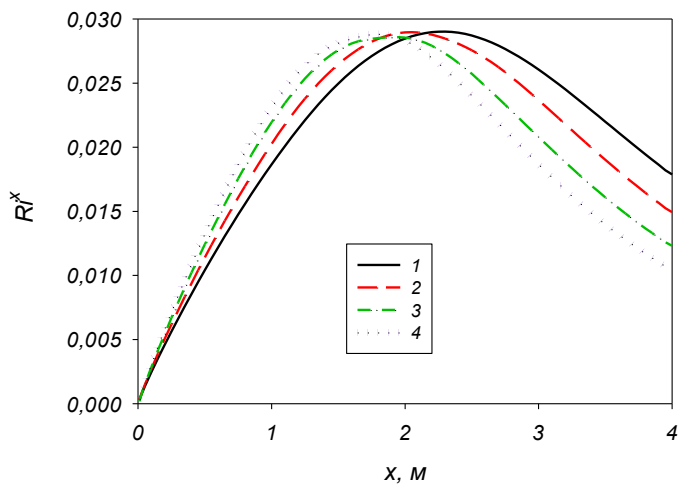


Рис. 4. Розподіл числа Річардсона вздовж нагріваної довжини труби для варіантів розрахунків 1 - 4.

потoku. Тобто наведена картина поведінки числа Ri^x свідчить про те, що вплив даних сил по довжині каналу зростає, досягає максимуму і потім спадає.

Прояв впливу сил плавучості в умовах, що розглядаються, пов'язаний значною мірою з двома такими факторами: по-перше, з величиною різниці густини рідини в різних точках поперечного перерізу потоку і, по-друге, з його термічним прискоренням.

Щодо першого фактору, то саме екстремальна величина вказаної різниці густини, що є характерною для надкритичної води, визначає те, що сили плавучості мають набагато суттєвіший вплив на теплогідрравлічні параметри потоку при надкритичних тисках, ніж у докритичній області.

Більшим значенням різниці густини рідини у поперечному перерізі потоку відповідає, як відомо, більш суттєвий прояв архімедових сил. Одержані дані свідчать про те, що для всіх варіантів розрахунків різниця густини $\Delta\rho$ на вісі труби і поблизу її стінки змінюється по

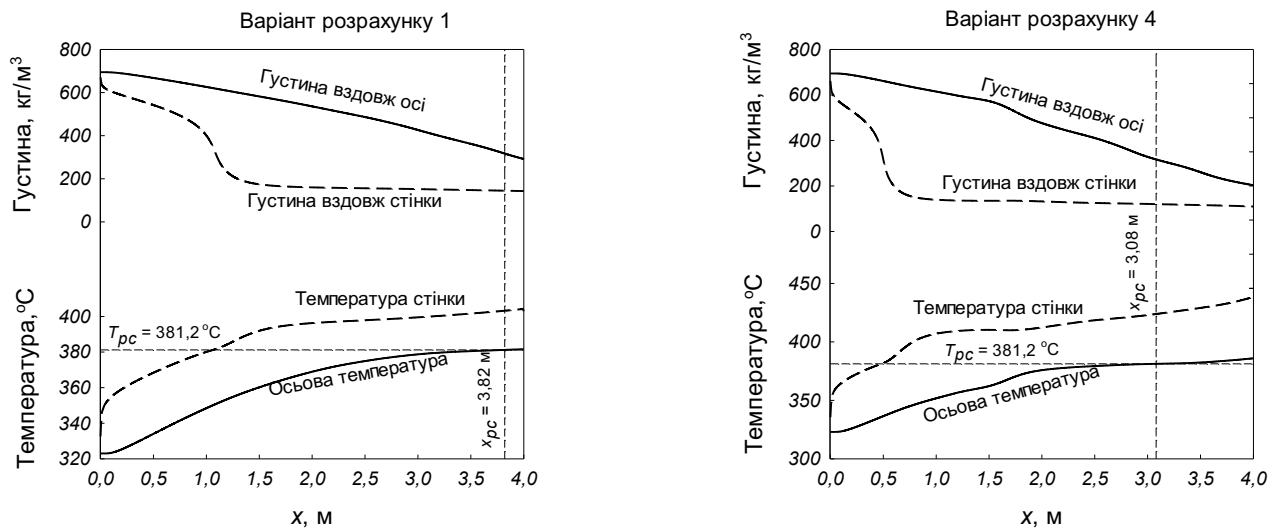


Рис. 5. Розподіл густини води вздовж осі і стінки труби для варіантів розрахунків 1 та 4.

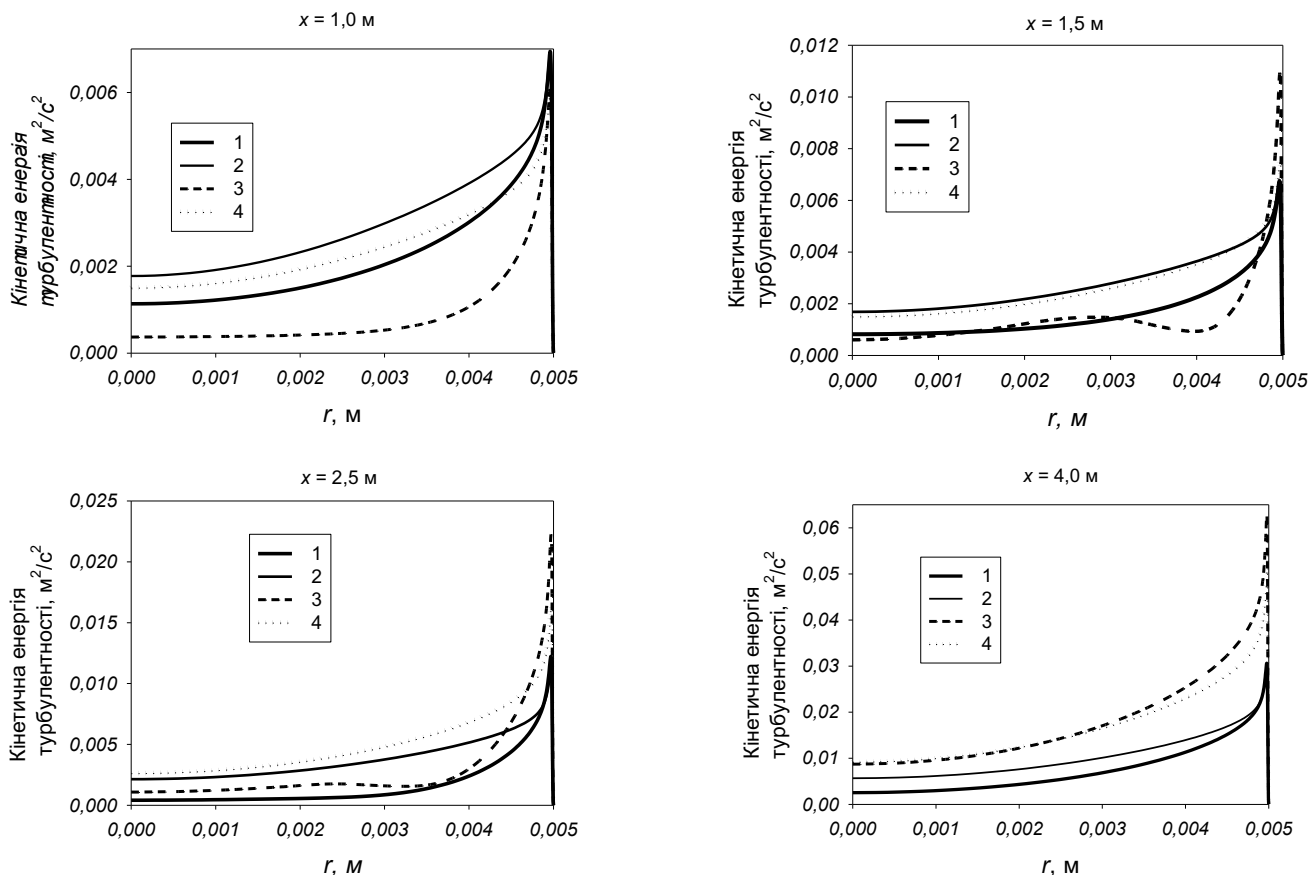


Рис. 6. Розподіл кінетичної енергії турбулентності вздовж радіусу труби на різних відстанях від вхідного перерізу x з урахуванням (лінії 1, 3) і без урахування (лінії 2, 4) сил плавучості для варіантів розрахунків 1 (лінії 1, 2) та 4 (лінії 3, 4).

довжині таким чином. На початковій нагріваній ділянці труби вона зростає, досягає максимуму і на вихідній ділянці труби зменшується (рис. 5). Тобто поведінка

різниці густини рідини $\Delta\rho$ відповідає описаній вище картині прояву впливу архімедових сил.

Другий з вказаних факторів – термічне прискорен-

ня потоку, навпаки пов'язаний з пригніченням розвитку природної конвекції. Дійсно, згідно з одержаними даними при русі рідини до вихідного перерізу каналу вона помітно прискорюється (тим більше, чим більше значення теплового потоку q), заважаючи дії архімедових сил, так що поблизу даного перерізу їх вплив практично зникає.

Сили плавучості можуть, як відомо, суттєво впливати на інтенсивність турбулентного переносу. А саме, під впливом цих сил відбувається певне затухання турбулентного переносу, що значною мірою визначає різні ефекти, пов'язані з погіршенням тепловіддачі. Зокрема, дія сил плавучості зумовлює зниження рівня кінетичної енергії турбулентності.

Рисунок 6 ілюструє профілі кінетичної енергії турбулентності, одержані з врахуванням і без врахування сил плавучості. Як випливає з наведених даних, значення кінетичної енергії турбулентності у разі врахування сил плавучості виявляється в цілому нижчим, ніж за відсутності даного врахування. Звертає на себе увагу також той факт, що характер профілів кінетичної енергії турбулентності для двох порівнюваних ситуацій може суттєво відрізнятися. А саме, профілі кінетичної енергії є монотонними за відсутності врахування сил плавучості. Щодо ситуації, коли таке врахування має місце, то дані профілі на центральній по довжині ділянці труби стають немонотонними з локальним мінімумом поблизу стінки труби. Розташування вказаних мінімумів кінетичної енергії відповідає розташуванню локальних максимумів на профілях швидкості. При цьому розбіжності в значеннях кінетичної енергії турбулентності, одержаних з врахуванням і без врахування сил плавучості, в області даних мінімумів є найбільшими. Тобто саме поблизу стінки труби, де прояв впливу сил плавучості найбільш яскраво виражений, спостерігається максимальне пригнічення турбулентного переносу.

Висновки

1. На основі CFD моделювання виконано аналіз двовимірної картини течії надкритичної води в вертикальних гладких трубах за умови реалізації режимів змішаної конвекції. Виявлено роль вільного руху теплоносія у формуванні структури потоку шляхом зіставлення числових розв'язків, що відповідають наявності і відсутності врахування сил плавучості.

2. Встановлено ефект локалізації впливу архімедових сил у центральній по довжині ділянці труби. При цьому:

а) виконано аналіз особливостей деформації радіальних профілів осьової швидкості по довжині каналу і показано, зокрема, що зона з М-подібним профілем швидкості, характерним для режиму змішаної конвекції, має місце лише в центральній по довжині зоні;

б) встановлено закономірності впливу густини теп-

лового потоку q на стінці труби на координати початку і кінця зон з М-подібним профілем швидкості. Показано, що чим більше значення q , тим вище за потоком починається і закінчується дана зона і тим більшою є її протяжність;

в) показано наявність певної кореляції поведінки радіальних профілів осьової швидкості зі зміною по довжині каналу локального числа Річардсона.

3. Виконано аналіз впливу сил плавучості на інтенсивність турбулентного переносу. Показано, що під впливом цих сил відбувається його пригнічення.

ЛІТЕРАТУРА

1. 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.

2. Abdulah R., Malin M., Agranat V., Piore 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.

3. 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.

4. Zvorykina A., Fialko N., Stryzheus S., Khmil D., Piore 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.

5. 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.

6. Farah A., Harvel G., Piore 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.

7. 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.

8. 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.

9. Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Алешко С.А., Стрижеус С.Н., Войтенко А.Ю., Хміль Д.П., Брусинская Я.В., Остапчук Т.С. Характеристики теплообмена в вертикальних трубах при сверхкритических давлениях. Сб. трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Киев: ИПЦ АЛКОН. 2017. С.122-126.

10. 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.

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

12. 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.

13. Фіалко Н.М., Піоро І.Л., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Алешко С.А. CFD моделювання теплообміну при течії води надкритичних параметрів у вертикальних гладких трубах. Промышленная теплотехника. 2018. №1. С.12-20.

SPECIFICS OF THE FLOW OF SUPERCRITICAL WATER UNDER CONDITIONS OF MIXED CONVECTION

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

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

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

³Faculty 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.3.2018.02>

A study of the specifics of supercritical water flow under conditions of mixed convection was made on the basis of CFD modeling. The results of comparison of the numerical solutions obtained in the presence and absence of the buoyancy forces are given. It is shown that the influence of Archimedean forces on the flow structure is localized in the central region of tube length. The data of computer modeling of supercritical water flow pattern with the variation of heat flux q on the tube wall are obtained. The dependence of the localization of mixed convection zone from the value of q is established. The change of the local Richardson number in the context of the effect of the localization of buoyancy forces action is analyzed. For the conditions under consideration, the dependence of turbulent transfer intensity on the effect of Archimedean forces is investigated. It is shown that this action causes oppression of turbulent transport, which is most significantly manifested near the wall of the tube.

Reference 13, figure 6.

Keywords: supercritical water, CFD simulation, mixed convection.

1. Fialko N.M., Piro 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. *Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]*, 2016. №5. P. 5-13. (in Rus).

2. Abdulah R., Malin M., Agranat V., Piro 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.

3. 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).

4. Zvorykina A., Fialko N., Stryzheus S., Khmil D., Piro 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.

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

6. Farah A., Harvel G., Piro 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.

7. Fialko N.M., Piro 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. *Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]*, 2016. №4. P. 5-13. (in Rus).

8. 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.

9. Fialko N.M., Sherenkovskiy Yu.V., Meranova N.O., Alioshko S.A., Stryzheus S.N., Voitenko A.Yu., Khmil D.P., Brusinskaya Ya.V., Ostapchuk T.S. Characteristics of Heat Transfer in Vertical Pipes at Supercritical Pressures. *Collection of Works "Problems of Ecology and Operation of Energy Facilities"*. Kiev: IPC ALCON. 2017. P.122-126. (in Rus).

10. Zvorykin A., Fialko N., Sherenkovskiy Ju., Alioshko S., Meranova N., Hanzha M., Bashkir I., Stryzheus S., Voitenko A., Piro 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.

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

12. Zvorykin A., Fialko N., Meranova N., Alioshko S., Maison N., Voitenko A., Piro 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.

13. Fialko N.M., Piro 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. *Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]*, 2018. № 1. P. 12-20. (in Ukr)

Отримано 28.08.2018

Received 28.08.2018