

УДК 536.242

## CFD МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ ТЕЧІЇ ВОДИ НАДКРИТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ У ВЕРТИКАЛЬНИХ ГЛАДКИХ ТРУБАХ

Фіалко Н.М.<sup>1</sup>, член-кореспондент НАН України, Піоро І.Л.<sup>2</sup>, докт. техн. наук,  
 Прокопов В.Г.<sup>1</sup>, докт. техн. наук, Шеренковський Ю.В.<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
 Меранова Н.О.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Альошко С.О.<sup>1</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03057, Україна

<sup>2</sup> Faculty of Energy Systems and Nuclear Science University of Ontario Institute of Technology 2000 Simcoe Str. N., Oshawa ON L1K 7K4 Canada

Наведено результати CFD моделювання теплообміну в умовах висхідної течії надкритичної води у вертикальних гладких трубах при зміні в широких межах масової швидкості і теплового потоку на стінці каналу. Представлено результати зіставлення експериментальних і розрахункових даних для різних режимів теплообміну – покращеного, нормального і погіршеного. Виконано аналіз результатів CFD моделювання щодо просторового розподілу фізичних властивостей надкритичної води.

Приведены результаты CFD моделирования теплообмена в условиях восходящего течения сверхкритической воды в вертикальных гладких трубах при изменении в широких пределах массовой скорости и теплового потока на стенке канала. Представлены результаты сопоставления экспериментальных и расчетных данных для различных режимов теплообмена - улучшенного, нормального и ухудшенного. Выполнен анализ результатов CFD моделирования, касающихся пространственного распределения физических свойств сверхкритической воды.

The results of the CFD modeling of heat transfer under condition of the upstream flow of supercritical water in vertical bare tubes are presented with a change in the wide range of mass flux and heat flux at the channel wall. The results of comparison of experimental and calculated data for different heat transfer regimes - improved, normal and deteriorated - are presented. The results of the CFD modeling relating to the spatial distribution of physical properties of supercritical water are analyzed.

Бібл. 13, рис. 8., табл. 1.

**Ключові слова:** надкритична вода, покращений, нормальний, погіршений режими теплообміну, CFD моделювання, фізичні властивості надкритичної води.

$c$  – питома теплоємність, кДж/(кг·К);  
 $D$  – внутрішній діаметр, м;  
 $G$  – масова швидкість, кг/(м<sup>2</sup>с);  
 $L$  – нагрівана довжина труби, м;  
 $P$  – тиск, МПа;  
 $q$  – густина теплового потоку на стінці труби, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $T$  – температура, °С;  
 $Tu$  – інтенсивність турбулентності, %;  
 $x$  – осьова координата, м;  
 $y^+$  – безрозмірне значення відстані від поверхні стінки до першої комірки сітки;  
 $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>К);  
 $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, кВт/(м·К);  
 $\mu$  – динамічна в'язкість, Па·с;  
 $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>.

### Нижні індекси:

$vx$  – вхідний;  
 $vix$  – вихідний;  
 $b$  – середньомасовий за поперечним перерізом труби (bulk);  
 $pc$  – псевдокритичний (pseudocritical).

### Скорочення:

CFD – (Computational Fluid Dynamics) розрахункова гідродинаміка;  
 SCWR – (Super Critical Water-cooled Reactor) надкритичний реактор з водяним охолодженням;  
 SST – (Shear Stress Transport turbulent model) модель турбулентності переносу зсувних напруг.

### Вступ

Один із шляхів підвищення теплової ефективності атомних електростанцій з водоохолоджуваними реакторами полягає у переході від докритичних до надкритичних параметрів теплоносія. Цей перехід вважається загальноприйнятим в теплоенергетиці і базується на успішному освоєнні вугільними електростанціями області надкритичних тисків в 60-70-х роках ХХ століття. Здійснення вказаного переходу в атомній

енергетиці потребує глибокого знання особливостей теплогідродинаміки в реакторах з водою надкритичних параметрів (SCWR) [1, 2].

Останнім часом велика увага приділяється розрахунковим дослідженням теплогідродинамічних характеристик надкритичних рідин в гладких трубах [3-11]. Такий підхід є консервативним по відношенню до тепловидільних зборок, оскільки в останніх мають місце додаткові тепломасоперетоки, зумовлені складністю

їхньої конфігурації.

Дана стаття присвячена CFD аналізу теплообміну для висхідних потоків у вертикальних гладких трубах, що охолоджуються водою при надкритичних тисках. При цьому наводяться результати зіставлення експериментальних і розрахункових даних за коефіцієнтом тепловіддачі і температурою стінки в умовах реалізації різних режимів тепловіддачі – покращеного, нормального і погіршеного. Певна увага приділяється також аналізу просторової картини фізичних властивостей надкритичної води.

#### Методика проведення досліджень

Як об'єкт теплофізичних досліджень розглянута ситуація відповідно до задачі змішаної конвекції (при вимушеному і вільному русі) в умовах суттєвої залежності властивостей рідини від температури. В роботі дана задача вирішувалася в двовимірній вісесиметричній постановці. З метою стабілізації течії перед входом в трубу розрахункова область збільшувалася уверх по потоку за рахунок початкової ділянки довжиною 1,2 м, яка не обігрівалася. У вхідному перерізі труби швидкість і температура приймалися постійними, а величина

інтенсивності турбулентності  $Tu$  – дорівнювала 3 %. У вихідному перерізі труби ставилися «м'які» граничні умови. На обтічних водою поверхнях труби задавалися умови прилипання. На ділянці труби, що не обігрівалася, як теплові приймалися умови адиабатичності, на ділянці, що обігрівалася, - умови постійного по довжині труби тепловідводу до її стінки. Розрахункова область покривалася нерівномірною сіткою з суттєвим згущенням біля стінок труби і містила 120x520 комірок. Пристінковий крок задавався рівним  $1,5 \cdot 10^{-6}$  м, що забезпечувало значення  $y^+ < 0,7$ . Для визначення фізичних властивостей надкритичної води використовувалася програма NIST REFPROP, інтегрована в FLUENT код [12]. Розв'язання поставленої задачі здійснювалося з подвійною точністю.

При розв'язанні використовувалась  $k-\omega$  SST модель турбулентності. Результати верифікації моделей турбулентності наведено в [7].

#### Результати досліджень та їх аналіз

Основні параметри для варіантів CFD моделювання представлено в табл. 1. В усіх розрахункових варіантах внутрішній діаметр  $D$  і нагрівана довжина  $L$  труби були незмінними:  $D = 10$  мм,  $L = 4$  м.

Таблиця 1. Параметри для варіантів CFD моделювання

Варіант	$G$ , кг/м <sup>2</sup> с	$q$ , кВт/м <sup>2</sup>	$P$ , МПа	$T_{вх}$ , °С
1	1002	392	24.0	341
2	992	729	24.0	342
3	1000	826	24.0	343
4	503	189	24.4	321
5	494	287	24.2	325

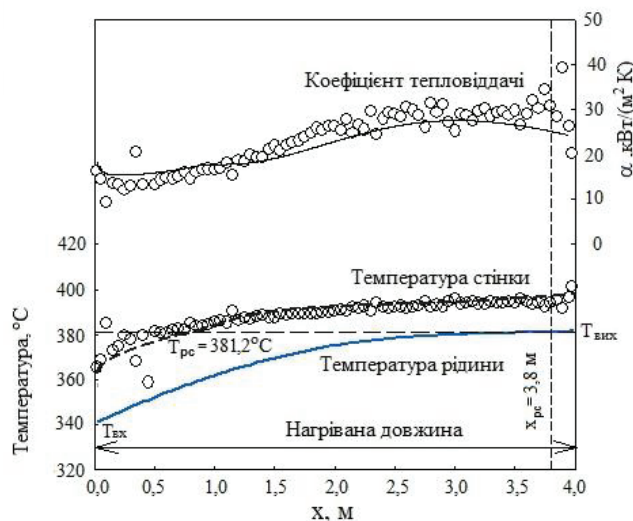


Рис. 1. Зіставлення значень коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  і температури стінки, одержаних на основі CFD моделювання (суцільні лінії), з експериментальними даними (кружки) для варіанту розрахунків 1 (див. табл. 1).

Для зіставлення з результатами CFD моделювання використовувалися експериментальні дані, одержані в Державному науковому центрі Російської Федерації - Інституті фізики та енергетики (Обнінськ) [13].

Рис. 1 - 3 ілюструють зіставлення CFD передбачень з результатами експериментальних досліджень для варіантів розрахунків 1-3, які відповідають значенням масової швидкості  $G$ , що дорівнює приблизно  $1000 \text{ кг/м}^2\text{с}$ . Значення  $x$  на рисунках відповідає осевій координаті, при якій середньомасова температура надкритичної води  $T_b$  дорівнює температурі  $T_{pc}$  псевдокритичного переходу. Як видно з експериментальних даних, зі збільшенням теплового потоку  $q$  тепловіддача змінюється від покращеної при  $q = 392 \text{ кВт/м}^2$  до погіршеної при  $q = 826 \text{ кВт/м}^2$ .

Покращена тепловіддача характеризується, як відомо, більш високими коефіцієнтами тепловіддачі в порівнянні з нормальною тепловіддачею і, отже, більш низькими значеннями температури стінки, яка монотонно зростає по довжині труби. Такий режим тепловіддачі в трубах спостерігається, зазвичай, в області, що передуює перерізу, в якому температура  $T_b = T_{pc}$ . У розглянутих умовах значення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  в області покращеного теплообміну складають  $25 \dots 35 \text{ кВт/(м}^2\text{К)}$ , а температура стінки не перевищує  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ . Згідно з отриманими даними при покращеній тепловіддачі спостерігається хороше узгодження експериментальних даних і CFD передбачень вздовж нагріваної довжини труби (рис.1).

Як впливає з результатів експериментальних досліджень, при збільшенні теплового потоку до  $q = 729 \text{ кВт/м}^2$  за перерізом, в якому середньомасова температура надкритичної води  $T_b$  досягає темпера-

тури  $T_{pc}$  псевдокритичного переходу, спостерігаються дві зони з дещо зниженими значеннями коефіцієнтів тепловіддачі і, відповідно, з підвищеними температурами стінки (рис. 2). Це свідчить про початок процесу погіршеного теплообміну за даної величини  $q$ . Подальше підвищення теплового потоку до  $q = 826 \text{ кВт/м}^2$  призводить до появи яскраво вираженого локального мінімуму коефіцієнта тепловіддачі на кривій  $\alpha = f(x)$ , і відповідного максимуму температури стінки (рис. 3). Зазначені екстремуми розташовуються за перерізом  $x = x_{pc}$  як і в ситуації  $q = 729 \text{ кВт/м}^2$ .

Щодо зіставлення експериментальних і розрахункових даних для варіантів 2, 3, то тут кількісні розбіжності між CFD прогнозами і експериментальними даними стають дещо більш суттєвими (рис. 2, 3). Це перш за все стосується локальних екстремумів коефіцієнтів тепловіддачі і температури стінки. Дана обставина очевидно зумовлена тим, що математичні моделі, які використовуються при розрахунках, не містять опису особливостей механізму погіршеного теплообміну. Щодо вказаних механізмів, то в даний час відсутні загально визнані фізичні уявлення про їх природу, а відтак не сформульовані і відповідні математичні моделі.

Рисунки 4 і 5 ілюструють зіставлення експериментальних і розрахункових даних для варіантів 4 і 5, які відповідають масовій швидкості, що дорівнює приблизно  $500 \text{ кг/м}^2\text{с}$ . За цих умов спостерігається цілком задовільне узгодження CFD прогнозів щодо температури внутрішньої поверхні труби і коефіцієнта тепловіддачі з результатами експериментів. При цьому в разі варіанту 4 дане узгодження є кращим.

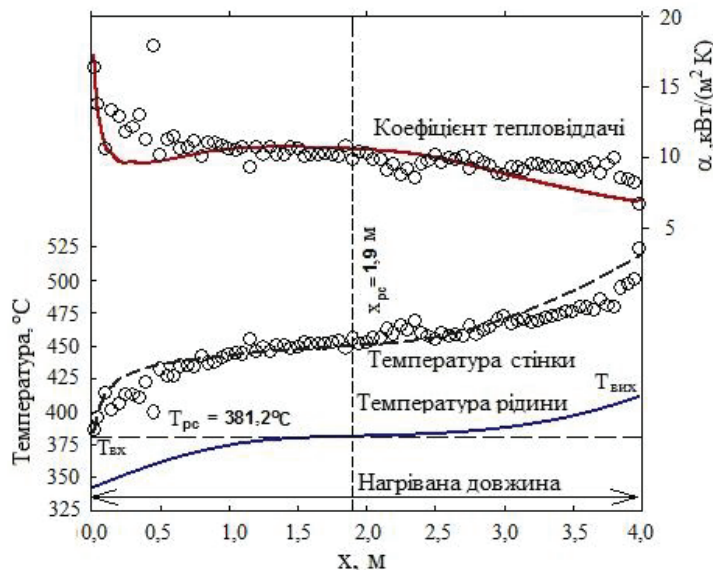


Рис. 2. Зіставлення значень коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  і температури стінки, одержаних на основі CFD моделювання (суцільні лінії), з експериментальними даними (кружки) для варіанту розрахунків 2 (див. табл. 1).

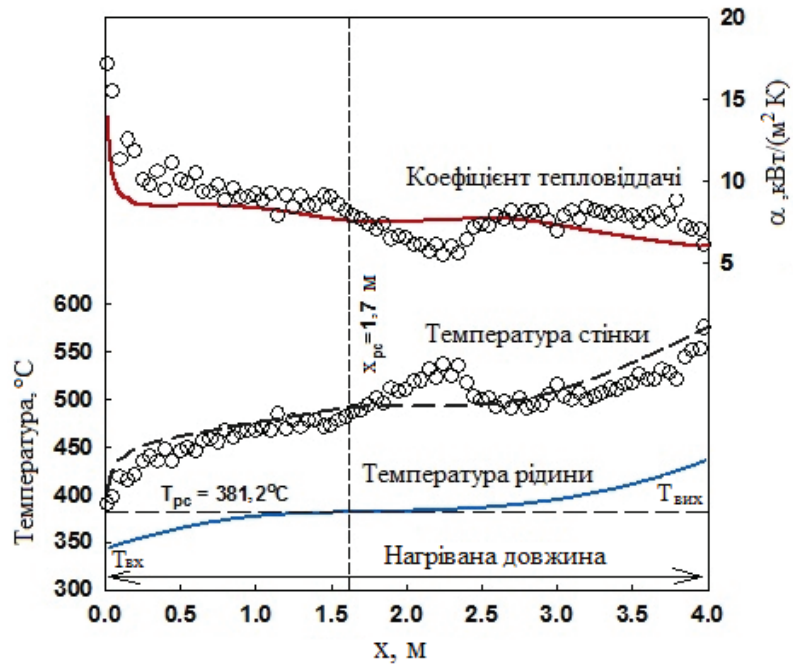


Рис. 3. Зіставлення значень коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  і температури стінки, одержаних на основі CFD моделювання (суцільні лінії), з експериментальними даними (кружки) для варіанту розрахунків 3 (див. табл. 1).

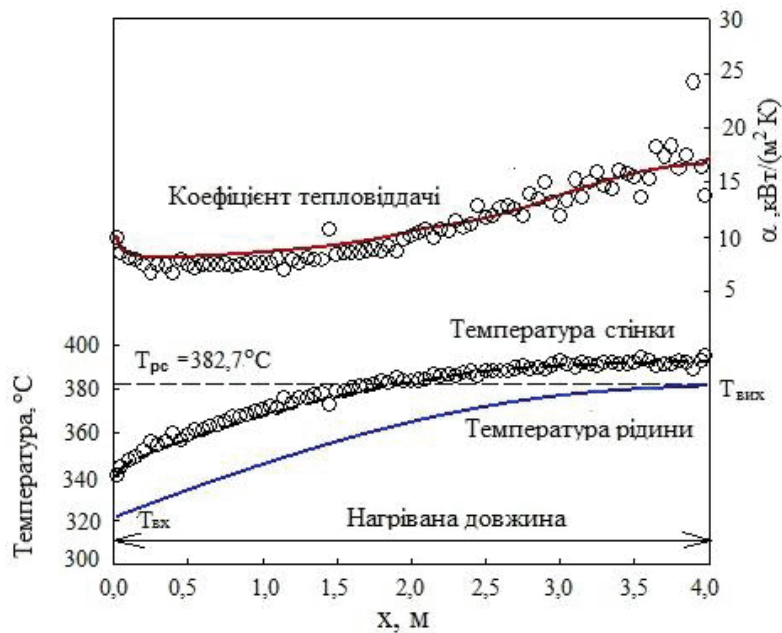


Рис. 4. Зіставлення значень коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  і температури стінки, одержаних на основі CFD моделювання (суцільні лінії), з експериментальними даними (кружки) для варіанту розрахунків 4 (див. табл. 1).

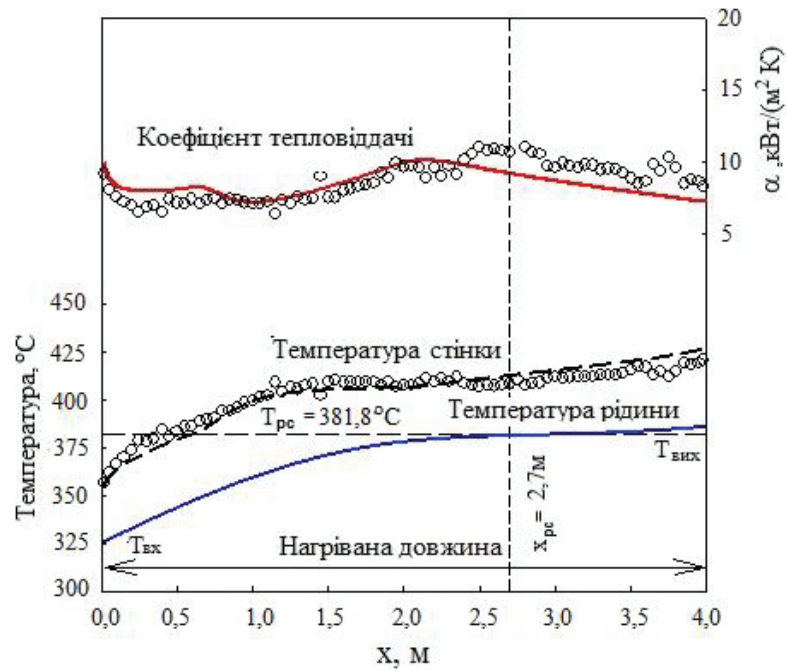


Рис. 5. Зіставлення значень коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  і температури стінки, одержаних на основі CFD моделювання (суцільні лінії), з експериментальними даними (кружки) для варіанту розрахунків 5 (див. табл. 1).

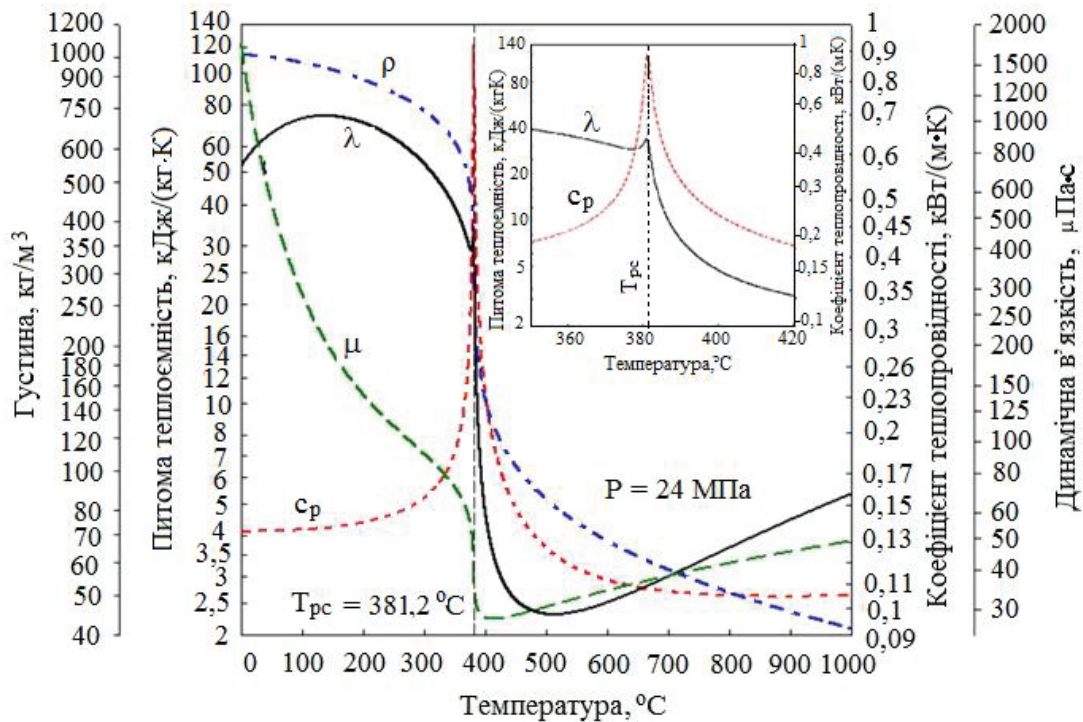


Рис. 6. Температурна залежність густини, коефіцієнта теплопровідності, динамічної в'язкості та питомої теплоємності води при тиску  $P = 24 \text{ МПа}$ .

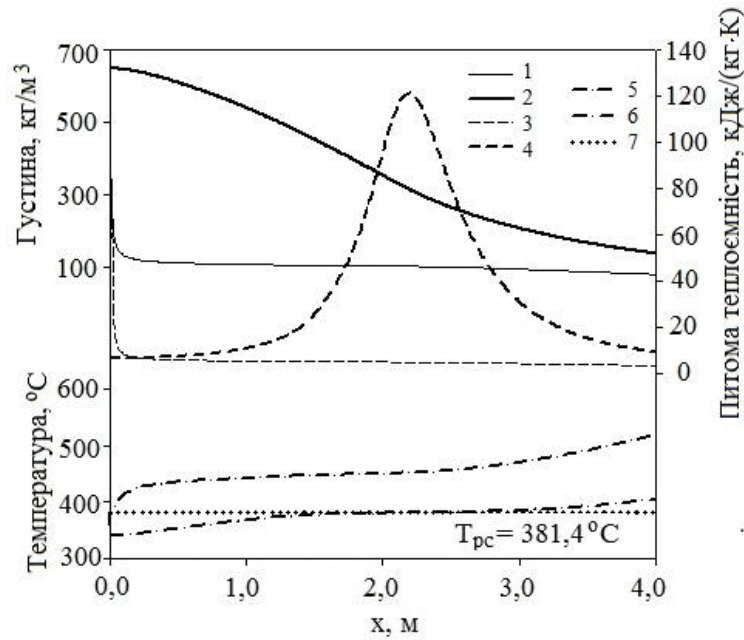


Рис. 7. Зміна густини (1, 2) і питомої теплоємності (3,4) надкритичної води, розрахованих за осью (2,4) температурою і температурою стінки (1,3), а також профілі температури стінки (5), осьової температури (6) і температури псевдокритичного переходу (7) вздовж нагріваної довжини труби для варіанта розрахунків 2 (див. табл. 1).

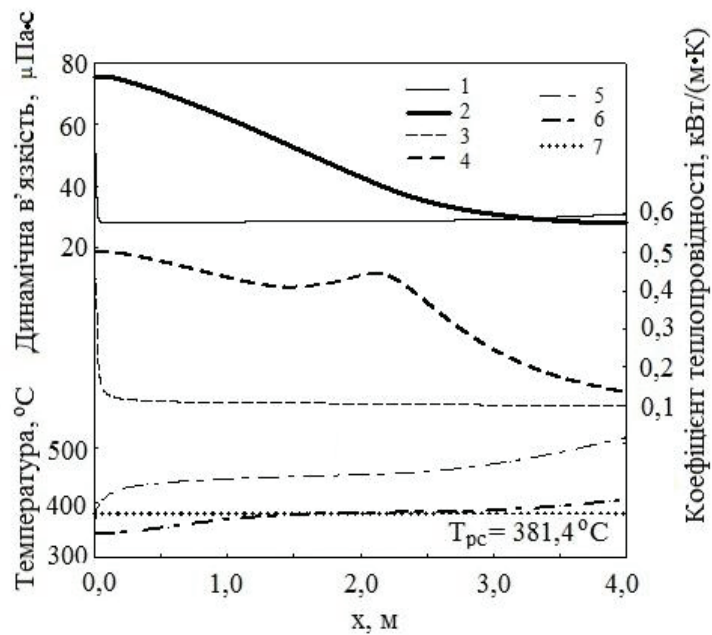


Рис. 8. Зміна динамічної в'язкості (1,2) і коефіцієнта теплопровідності (3, 4) надкритичної води, розрахованих за осью (2,4) температурою і температурою стінки (1,3), а також профілі температури стінки (5), осьової температури (6) і температури псевдокритичного переходу (7) вздовж нагріваної довжини труби для варіанта розрахунків 2 (див. табл. 1).

Особливості теплообміну при надкритичних тисках пов'язані, як вже зазначалося, з суттєвою залежністю фізичних властивостей теплоносія від температури. На рис. 6 наведено температурну залежність густини, коефіцієнта теплопровідності, динамічної в'язкості та питомої теплоємності води при тиску  $P = 24$  МПа. Як видно, при температурі псевдофазового переходу  $T_{pc}$  має місце різка зміна вказаних властивостей.

Рис. 7, 8 ілюструють результати CFD моделювання щодо розподілу вздовж довжини труби фізичних властивостей теплоносія, розрахованих за осьовою температурою та за температурою стінки. Згідно з наведеними даними властивості води можуть значно змінюватися за потоком. При цьому їх поведінка суттєво відрізняється на осі та поблизу стінки труби. Звертає на себе увагу також той факт, що наведені залежності мають екстремуми, положення яких відповідає зонам навколо псевдокритичної температури.

Представлені властивості води поблизу стінки труби залишаються практично незмінними вздовж її довжини, за винятком зони в безпосередній близькості до входу в канал, де її температура нижче псевдокритичної. Властивості ж води на осі труби змінюються по її довжині більш суттєво. При цьому положення максимумів на кривих  $\lambda = f(x)$ ,  $c_p = f(x)$  відповідають координаті, при якій температура на осі труби досягає температури псевдофазового переходу.

### Висновки

1. На основі комерційного програмного продукту FLUENT виконано моделювання теплообміну висхідних потоків надкритичної води в вертикальних гладких трубах з нагріваючою довжиною 4 м і внутрішнім діаметром 10 мм при порівняно високих ( $G \approx 1000$  кг/м<sup>2</sup>с) і середніх ( $G \approx 500$  кг/м<sup>2</sup>с) значеннях масової швидкості і різних величинах густини теплового потоку на стінці (від 189 кВт/м<sup>2</sup> до 826 кВт/м<sup>2</sup>).

2. Проведено зіставлення CFD передбачень і експериментальних даних щодо температури внутрішньої поверхні стінки труби і коефіцієнта тепловіддачі. Показано, що при  $G \approx 1000$  кг/м<sup>2</sup>с у випадку відносно низької густини теплового потоку ( $q = 392$  кВт/м<sup>2</sup>), в умовах реалізації режиму покращеного теплообміну спостерігається хороше узгодження порівнюваних даних по всій довжині труби. При підвищенні густини теплового потоку до 729 кВт/м<sup>2</sup> і далі до 826 кВт/м<sup>2</sup> і появі режиму погіршеного теплообміну в центральній по довжині частині труби кількісні розбіжності між CFD передбаченнями і експериментальними даними стають дещо більш значними і стосуються, насамперед, локальних екстремумів коефіцієнтів тепловіддачі і температури стінки, які не відображаються в результатах розрахунків. Зроблено висновок про необхідність подальшого розвитку комп'ютерних моделей щодо опису умов погіршеного теплообміну.

3. Виконано аналіз результатів CFD моделювання щодо просторового розподілу в каналі таких властивостей надкритичної води, як коефіцієнт теплопровідності, питома теплоємність, динамічна в'язкість та густина.

Встановлено, що для умов, які розглядаються, вказані величини на осі труби суттєво змінюються по її довжині і залишаються практично незмінними за потоком поблизу стінки каналу, виключаючи незначну зону поблизу входу в трубу.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Piore I., Duffey R. Nuclear Power as a Basis for Future Electricity Generation, Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, 2015, V.1, №1, pp. 011001-1 – 011001-19. [Eng.]

2. Калякин С.Г., Кириллов П.Л., Баранов Ю.Д. Перспективы разработки инновационного водоохлаждаемого ядерного реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя, Теплоэнергетика, 2014, №8, с. 13-19.

3. Agranat V., Malin M., Piore I., Abdullah R., and Perminov V.A. CFD Modelling of Supercritical Water Heat Transfer in a Vertical Bare Tube Upward Flow, Proceedings of ICONE-23, May 17-21, Chiba, Japan, 2015, Paper #1163, 11 pages. [Eng.]

4. Cheng X., Kuang B., and Yang Y.H. Numerical analysis of heat transfer in supercritical water cooled flow channels, Nuclear Engineering and Design, 237, 2007, pp. 240-252. [Eng.]

5. Jaromin M. and Anglart H. A Numerical Study of the Turbulent Prandtl Number Impact on Heat Transfer to Supercritical Water Flowing Upward under Deteriorated Conditions, Proc. 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal hydraulics (NURETH-15), May 12-17, Pisa, Italy, 2013, Paper #134, 14 pages. [Eng.]

6. Agranat V., Piore I., Malin M., Abdullah R. CFD Modeling of Supercritical Water Heat Transfer in a Vertical Bare Tube upward Flow, Proceedings of the 23th International Conference On Nuclear Engineering (ICONE-23), May 17-21, Chiba, Japan, 2015, 11 pages. [Eng.]

7. Фялко Н.М., Пиоро И.Л., Майсон Н.В., Меранова Н.О. Моделирование течения и теплообмена в гладких трубах при сверхкритических давлениях, Промышленная теплотехника, 2016, т.38, №3, с.10-17.

8. Gu, H.Y., Cheng, X., Yang, Y.H. CFD analysis of thermal-hydraulic behaviour in SCWR typical flow channels, Nuclear Engineering and Design, 2008, 238, pp. 3348-3359. [Eng.]

9. Фялко 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, т.38, №4, с.5-13

10. Koshizuka S., Takano N. and Oka Y. Numerical Analysis of Deterioration Phenomena in Heat Transfer to Supercritical Water, Int. J. Heat Mass Transfer, 1995, 38, pp.3077-3084. [Eng.]

11. Zvorykin A., Fialko N., Meranova N., Aleshko S., Maison N., Voitenko A., and Piore I. Computer Simulation of Flow and Heat Transfer in Bare Tubes at Supercritical Parameters, Proceedings of the 24th International Conference On Nuclear Engineering (ICONE-24), June 26-30, Charlotte, NC, USA, Paper #60390, 2016, 12 pages. [Eng.]

12. *National Institute of Standards and Technology, NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties – REFPROP, NIST Standard Reference Database 23, Ver.8.0, Boulder, CO, U.S., Department of Commerce, 2007. [Eng.]*

13. *Pirotto I.L., Kirillov P.L., Mokry S.J., and Gospodinov Y.K. 2008, Supercritical Water Heat Transfer in a Vertical Bare Tube: Normal, Improved and Deteriorated Regimes, Proceedings ICAPP'08 Anaheim, CA, USA, June 8-12, 2008, Paper #8333, pp. 1843-1852. [Eng.]*



## CFD MODELING OF HEAT TRANSFER UNDER FLOW OF SUPERCRITICAL PARAMETERS WATER IN VERTICAL BARE TUBES

Fialko N.M.<sup>1</sup>, Pioro I.L.<sup>2</sup>, Prokopov V.G.<sup>1</sup>,  
Sherenkovskiy Ju.V.<sup>1</sup>, Meranova N.O.<sup>1</sup>, Alioshko S.O.<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Faculty of Energy Systems and Nuclear Science University of Ontario Institute of Technology 2000 Simcoe Str. N., Oshawa ON L1K 7K4 Canada

Reference 13, figure 8, tabl. 1.

**Key words:** supercritical water, improved, normal, deteriorated heat transfer regimes, CFD simulation, physical properties of supercritical water.

The results of the CFD modeling of heat transfer under condition of the upstream flow of supercritical water in vertical bare tubes are presented with a change in the wide range of mass flux and heat flux at the channel wall. The results of comparison of experimental and calculated data for different heat transfer regimes - improved, normal and deteriorated - are presented. It is shown that, under the conditions of the improved heat transfer regime, a good agreement of the compared data over the entire length of the tube is observed. When the deteriorated heat transfer regime appears, the quantitative discrepancies between CFD predictions and experimental data are somewhat more significant. At the same time, the results of computational studies do not reflect the presence of local extrema of heat transfer coefficients and wall temperatures which are typical for this heat transfer regime. The results of the CFD modeling relating to the spatial distribution of physical properties of supercritical water are analyzed

1. Pioro I., Duffey R. Nuclear Power as a Basis for Future Electricity Generation, *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, 2015, V.1, №1, pp. 011001-1 – 011001-19. [Eng.]

2. Kalyakin S.G., Kirillov P.L., Baranov Yu.D. Prospects for the development of an innovative water cooled nuclear reactor with supercritical coolant parameters, *Thermal Engineering*, [Теплоэнергетика], 2014, №. 8, pp. 13-19. [Rus.]

3. Agranat V., Malin M., Pioro I., Abdullah R., and Perminov V.A. CFD Modelling of Supercritical Water Heat Transfer in a Vertical Bare Tube Upward Flow, *Proceedings of ICONE-23*, May 17-21, Chiba, Japan, 2015, Paper #1163, 11 pages. [Eng.]

4. Cheng, X., Kuang, B., and Yang, Y.H. Numerical analysis of heat transfer in supercritical water cooled flow channels, *Nuclear Engineering and Design*, 237, 2007, pp. 240-252. [Eng.]

5. Jaromin M. and Anglart H. A Numerical Study of the Turbulent Prandtl Number Impact on Heat Transfer to Supercritical Water Flowing Upward under Deteriorated Conditions, *Proc. 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal hydraulics (NURETH-15)*, May 12–17, Pisa, Italy, 2013, Paper #134, 14 pages. [Eng.]

6. Agranat V., Pioro I., Malin M., Abdullah R. CFD Modeling of Supercritical Water Heat Transfer in a Vertical Bare Tube upward Flow, *Proceedings of the 23th International Conference On Nuclear Engineering (ICONE-23)*, May 17-21, Chiba, Japan, 2015, 11 pages. [Eng.]

7. Fialko N.M., Pioro I.L., Maison N.V. and Meranova N.O. Simulation of Flow and Heat Transfer in Bare Tubes at Supercritical Pressure, *Industrial Engineering*, [Promyshlennaia Teplotekhnika], 2016, №3. pp. 10-17. [Rus.]

8. Gu, H.Y., Cheng, X., Yang, Y.H. CFD analysis of thermal-hydraulic behaviour in SCWR typical flow channels, *Nuclear Engineering and Design*, 2008, 238, pp. 3348-3359. [Eng.]

9. Fialko N.M., Pioro I.L., Maison N.V., Meranova N.O., and Sharaevsky I.G. Effect of Mass Flux on Flow Characteristics and Heat Transfer in Bare Tubes at Supercritical Parameters, *Industrial Engineering*, [Promyshlennaia Teplotekhnika], 2016, №4, pp.5-11. [Rus.]

10. Koshizuka S., Takano N. and Oka Y. Numerical Analysis of Deterioration Phenomena in Heat Transfer to Supercritical Water, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1995, 38, pp.3077-3084. [Eng.]

11. Zvorykin A., Fialko N., Meranova N., Aleshko S., Maison N., Voitenko A., and Pioro I. Computer Simulation of Flow and Heat Transfer in Bare Tubes at Supercritical Parameters, *Proceedings of the 24th International Conference On Nuclear Engineering (ICONE-24)*, June 26-30, Charlotte, NC, USA, Paper #60390, 2016, 12 pages. [Eng.]

12. *National Institute of Standards and Technology*, NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties – REFPROP, NIST Standard Reference Database 23, Ver.8.0, Boulder, CO, U.S., Department of Commerce, 2007. [Eng.]

13. Pioro I.L., Kirillov P.L., Mokry S.J., and Gospodinov Y.K. 2008, Supercritical Water Heat Transfer in a Vertical Bare Tube: Normal, Improved and Deteriorated Regimes, *Proceedings ICAPP'08 Anaheim, CA, USA*, June 8-12, 2008, Paper #8333, pp. 1843-1852. [Eng.]

Отримано 20.02.2018

Received 20.02.2018