

Технічні науки

УДК 538.9:536.6

Фіалко Наталія Михайлівна

*доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України, завідувач відділу
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Fialko Nataliia

*Doctor of Technical Sciences, Professor,
Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Head of Department
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Меранова Наталія Олегівна

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Meranova Nataliia

*Candidate of Technical Sciences (PhD),
Senior Scientific Researcher, Leading Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Шеренковський Юлій Владиславович

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України*

Sherenkovskiy Julii

*Candidate of Technical Sciences (PhD),
Senior Scientific Researcher, Leading Researcher
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

Альошко Сергій Олександрович

кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Aleshko Sergiy

Candidate of Technical Sciences (PhD), Leading Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Хміль Дмитро Петрович

молодший науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Khmil Dmytro

Junior Senior Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Шараєвський Ігор Георгійович

доктор технічних наук, доцент, завідувач сектору

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України

Sharaevsky Igor

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,

Head of the Sector

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of NAS of Ukraine

Зімін Леонід Борисович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник,

провідний науковий співробітник

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України

Zimin Leonid

Doctor of Technical Sciences, Senior Scientific Researcher,

Leading Researcher

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of NAS of Ukraine

Власенко Тетяна Станіславівна

кандидат фізико-математичних наук, завідував відділу

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України

Vlasenko Tetiana

Candidate of Physico-Mathematical Sciences (PhD),

Head of the Department

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of NAS of Ukraine

Дашковська Ірина Леонідівна

молодший науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Dashkovska Iryna

Junior Senior Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Чехаровська Марина Ігорівна

старший науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

Chekharovska Maryna

Senior Researcher

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

**ПРОСТОРОВИЙ РОЗПОДІЛ КІНЕМАТИЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ ВОДИ В
ТРУБАХ ПРИ НАДКРИТИЧНИХ ТИСКАХ
SPATIAL DISTRIBUTION OF THE KINEMATIC VISCOSITY OF
WATER IN PIPES AT SUPERCRITICAL PRESSURES**

Анотація. В статті представлено результати математичного моделювання просторових розподілів кінематичної в'язкості при висхідній течії надкритичної води у вертикальних гладких трубах.

Ключові слова: надкритична вода, CFD моделювання, кінематична в'язкість, густина.

Summary. The article presents the results of mathematical modeling of spatial distributions of kinematic viscosity during upward flow of supercritical water in vertical bare pipes.

Key words: supercritical water, CFD modeling, kinematic viscosity, density.

Вступ. Подальша розбудова АЕС є вельми актуальним питанням світової енергетики. Зокрема, велика увага приділяється застосуванню на атомних електростанціях нових високоефективних ядерних реакторів четвертого покоління [1]. Особливий інтерес становить водоохолоджувальні реакторні установки із надкритичним тиском. Розроблення промислових прототипів цих реакторів здійснюється згідно з міжнародною програмою «Generation-4» (SCWR).

Надкритична вода як теплоносій в таких реакторах має певні важливі особливості. Так, теплофізичні властивості надкритичної води можуть різко змінюватись зі зміною температури. При цьому найбільші зміни мають місце в області, що відповідає псевдокритичному переходу «псевдорідина-псевдогаз». З огляду на це важливим є аналіз особливостей зміни теплофізичних властивостей надкритичної води в робочих каналах активної зони реакторів з надкритичними параметрами. Такий аналіз ефективно проводиться методом комп'ютерного моделювання, що все більше застосовується для вирішення багатьох задач реакторної теплофізики [2-14]. Дана робота направлена на дослідження закономірностей зміни кінематичної в'язкості надкритичної води при її течії у вертикальних каналах на базі CFD моделювання.

Метою цієї роботи є порівняльний аналіз просторового розподілу кінематичної в'язкості надкритичної води при різних значеннях густини теплового потоку, що підводиться до стінки каналу, в умовах висхідної течії.

Для визначення просторового розподілу кінематичної в'язкості надкритичної води в каналі використовувались результати розв'язку нелінійної симетричної задачі змішаної конвекції при течії рідини у вертикальних гладких трубах. На вході в канал температура $T_{вх}$, тиск $P_{вх}$, інтенсивність турбулентності T_u та масова швидкість G приймалися постійними. З метою гідродинамічної стабілізації течії перед входом в канал, розрахункова область збільшувалась ввєрх за потоком за рахунок початкової ділянки довжиною l_n , що не нагрівається. На виході з каналу були задані «м'які» граничні умови. Значення густини теплового потоку q на стінці труби приймалися незмінними по її довжині.

Методика проведення досліджень базувалась на комп'ютерному моделюванні з використанням FLUENT коду. В математичній моделі досліджуваного процесу фізичні властивості води визначалися за програмою NISR RFR0P [15]. Виконані дослідження з верифікації моделей турбулентного переносу обґрунтували доцільність використання SST моделі турбулентності. Розрахункова область, яка використовувалась при розв'язуванні поставленої задачі, мала нерівномірну дискретизацію і містила 62400 комірок. Найменший крок біля стінки труби становив $1,5 \cdot 10^{-3}$ м. При цьому величина y^+ не перевищувала значення 0,7.

Вихідні дані, що використовувались при обчислюваних експериментах, становили: $T_{вх}=323^\circ\text{C}$; $P_{вх}=24,0$ МПа; $T_u=3\%$; $G=500$ кг/(м²с); $q=239$ кВт/м² і 310 кВт/м²; $d=0,01$ м; $l_n=1,2$ м; довжина нагріваної ділянки труби $L_1=4,0$ м. Температурна залежність густини ρ та кінематичної ν та динамічної μ в'язкості надкритичної води при $P_{вх}=24,0$ МПа зображена на рис. 1.

У досліджуваному інтервалі температур кінематична в'язкість надкритичної води майже не змінюється при зростанні температури до величини, що дещо нижча за температуру псевдокритичного переходу «псевдорідина-псевдогаз» ($T_{pc}=381^{\circ}\text{C}$). З подальшим зростанням температури в області, що відповідає псевдогазу, кінематична в'язкість зростає.

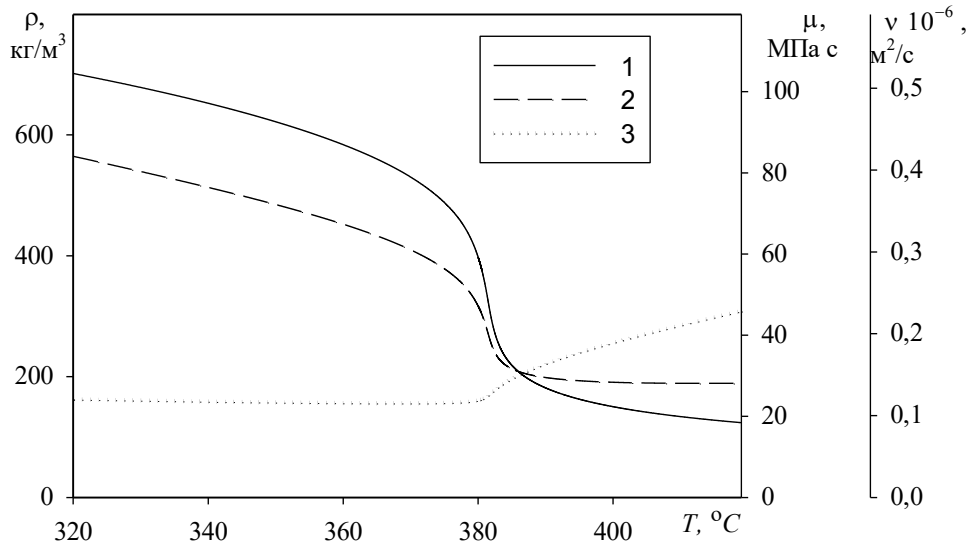


Рис. 1. Температурна залежність густини ρ (1) та динамічної μ (2) і кінематичної ν (3) в'язкості надкритичної води при $P_{вх}=24,0$ МПа

На рис. 2 наведено дані комп'ютерного моделювання щодо конфігурації фронту псевдофазового переходу в трубі при різних значеннях підведеного до її стінки теплового потоку q . Як видно, положення даного фронту, що відповідає ізотермі псевдофазового переходу, суттєво залежить від величини q . При більшому значенні підведеного теплового потоку q фронт псевдофазового переходу розташовується ближче до входу в канал. Відповідно зона, зайнята псевдорідиною, є суттєво меншою за розміром.

Рис. 3 ілюструє радіальний розподіл кінематичної в'язкості надкритичної води у різних поперечних перетинах труби $x=const$. При цьому рис.3а відповідає значенню підведеного теплового потоку $q=310$

кВт/м², а рис. 3б - $q=239$ кВт/м². Як свідчать наведені дані при обох розглянутих значеннях q радіальні розподіли в'язкості ν якісно схожі. А саме, величина ν суттєво змінюється по радіусу лише поблизу стінки труби. На деякій відстані від неї мають місце незначні зміни кінематичної в'язкості ν за радіусом. Такий характер поведінки величини ν відповідає радіальним температурним профілям надкритичної води. Останні характеризуються підвищеними рівнями температур поблизу стінки труби, та поступовим зниженням температури з віддаленням від неї.

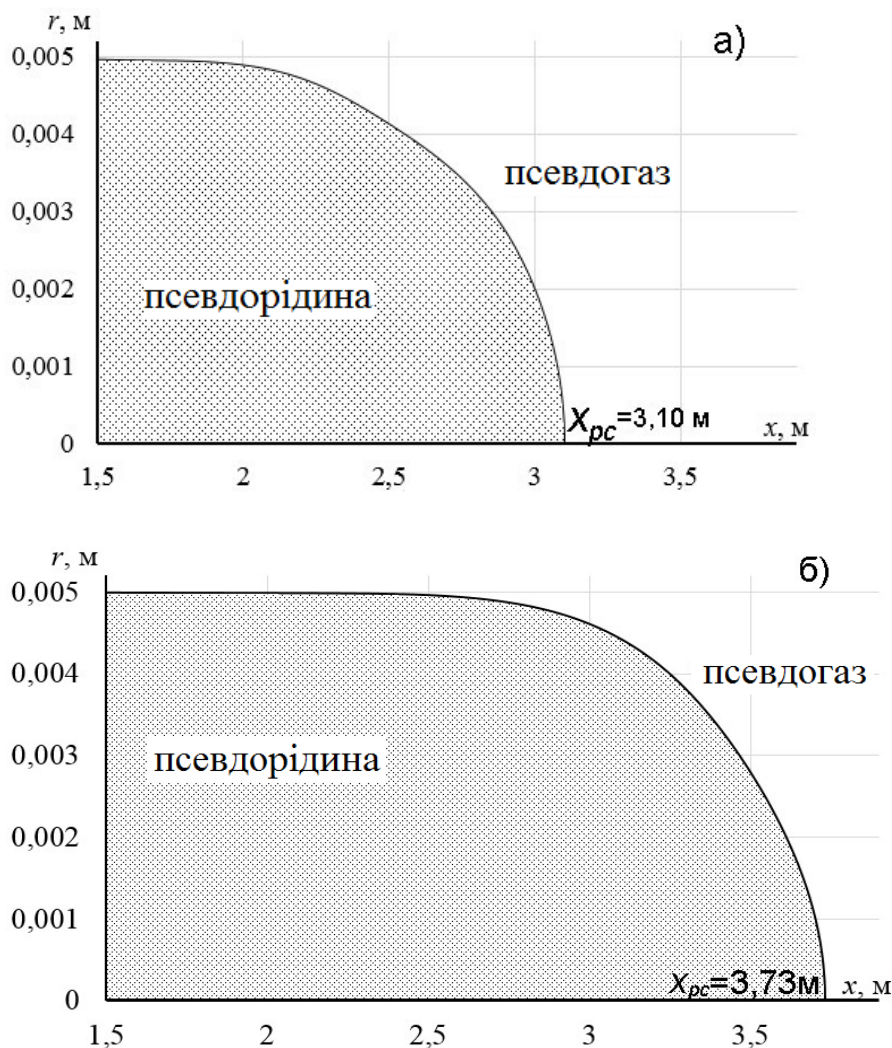


Рис. 2. Конфігурація фронту псевдокритичного фазового переходу надкритичної води в трубі для двох величин підведеного до стінки теплового потоку q . а) $q=310$ кВт/м²; б) $q=239$ кВт/м²

Щодо зміни радіальних розподілів ν по довжині труби, то для обох

розглянутих значень q вниз за потоком спостерігається зростання величини ν при незмінності характеру цих розподілів.

Радіальні профілі коефіцієнта кінематичної в'язкості ν попри якісну схожість при різних значеннях q мають суттєві кількісні відмінності. При цьому вказані відмінності зростають з віддаленням від вхідного перерізу каналу. Вищому значенню q ($q=310$ кВт/м²) відповідають більші величини ν в цих точках фіксованого поперечного перетину труби. Поряд з тим має місце зменшення розмірів зони в ядрі потоку, в якій величина ν є практично незмінною за радіусом.

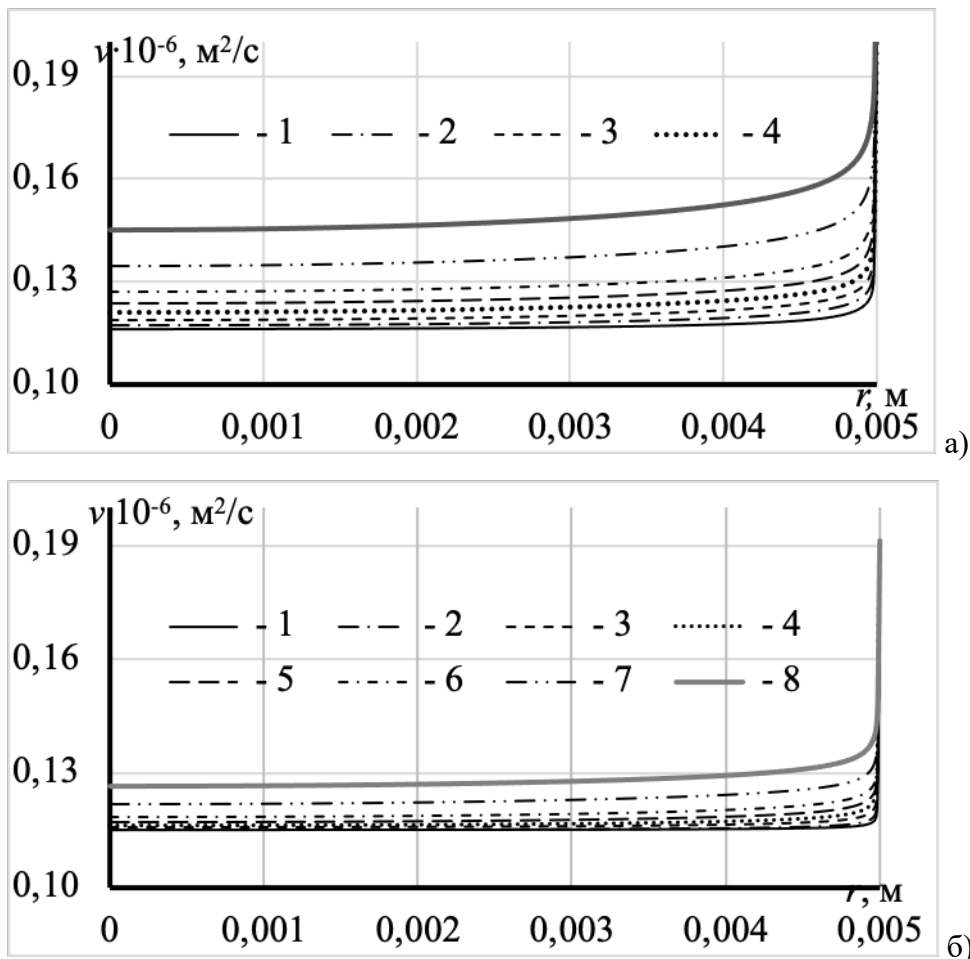


Рис. 3. Розподіл кінематичної в'язкості ν надкритичної води вздовж радіальної координати труби у фіксованих поперечних перетинах $x=\text{const}$: 1- $x=2,0$ м ; 2- $x=2,2$ м; 3- $x=2,4$ м; 4- $x=2,6$ м; 5- $x=2,8$ м; 6- $x=3,0$ м; 7- $x=3,4$ м; 8- $x=3,8$ м для двох величин підведеного до стінки теплового потоку q .

а) $q=310$ кВт/м²; б) $q=239$ кВт/м²

Висновки. На основі комп'ютерного моделювання виконано дослідження просторового розподілу кінематичної в'язкості надкритичної води в каналах при різних значеннях підведеного до стінки теплового потоку q ($q=310$ кВт/м² та $q=239$ кВт/м²).

Література

1. Шараєвський І.Г., Фіалко Н.М., Зімін Л.Б., Носовський А.В., Власенко Т.С., Шараєвський Г.І. Світові тенденції розвитку конструкцій водоохолоджуваних реакторів із надкритичним тиском. Ядерна енергетика та довідки. 2020. №2(17). С. 3-15.
2. Fialko N., Sherenkovskii Ju., Meranova N., Aleshko S., Vlasenko T. Thermophysical properties of supercritical water at an upward flow in vertical bare channels. Міжнародна мультидисциплінарна конференція «Наука і техніка сьогодення: пріоритетні напрямки розвитку України та Польщі». м. Воломін 19-20 жовтня 2018 р. С. 116-120. ISBN 978-9934-571-55-8.
3. Фіалко Н.М., Піоро І.Л., Шеренковський Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Шараєвський І.Г. Влияние теплового потока на стенке канала и давления воды на характеристики течения и теплообмена в гладких трубах при сверхкритических параметрах. Промышленная теплотехника. 2016. 38. №5. С.5-13.
4. Фіалко Н.М., Носовський А.В., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Шараєвський І.Г., Піоро І.Л. CFD аналіз тепловіддачі надкритичної води в умовах змішаної конвекції. Промислова теплотехніка. 2018. 40. №4. С. 5-12.
5. Zvorykina A., Khmil D., Fialko N., Pioro I., Stryzheus S. CFD Analysis of Supercritical-Water Flow and Heat Transfer in Vertical Bare Tube 26th

- International Conference on Nuclear Engineering, ICONE26-81045, (October 24, 2018), V009T16A003. 14 p.
6. Фіалко Н.М., Носовський А.В., Піоро І.Л., Шеренковський Ю.В., Мєранова Н.О., Альошко С.О., Хміль Д.П., Шараєвський І.Г., Зімін Л.Б. Дослідження особливостей теплообміну надкритичної води у вертикальних гладких трубах. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. К. : ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2019. С. 144-147.
 7. Фиалко Н.М., Пиоро И.Л., Майсон Н.В., Мєранова Н.О. Моделирование течения и теплообмена в гладких трубах при сверхкритических давлениях. Промышленная теплотехника. 2016. 38. №3. С. 10-17.
 8. Zvorykin A., Fialko N., Meranova N., Aleshko S., Maison N., Voitenko A., 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 p.
 9. Фиалко Н.М., Пиоро И.Л., Майсон Н.В., Мєранова Н.О., Шараевский И.Г. Влияние массовой скорости потока на характеристики течения и теплообмена в гладких трубах при сверхкритических параметрах. Промышленная теплотехника. 2016. 38. №4. С. 5-13.
 10. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Мєранова Н.О., Алешко С.А., Стрижеус С.Н., Войтенко А.Ю., Хміль Д.П., Брусинская Я.В., Остапчук Т.С. Характеристики теплообмена в вертикальных трубах при сверхкритических давлениях. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. К. : ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2017. С. 130-133.

11. Zvorykin A., Fialko N., Sherenkovskiy J., Aleshko 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 Pressures. Proceedings of the 25th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-25), July 2-6 2017, Shanghai, China, Paper #66528. 2017. 13 p.
12. Фіалко Н.М., Піоро І.Л., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Альошко С.О. CFD моделювання теплообміну при течії води надкритичних параметрів у вертикальних гладких трубах. Промышленная теплотехника. 2018. 40. №1. С.12-20.
13. Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Алешко С.А., Власенко Т.С., Шараевский И.Г., Зимин Л.Б., Стрижеус С.Н., Хмиль Д.П. Особенности изменения теплофизических свойств сверхкритической воды при течении в круглых обогреваемых трубах. Науковий вісник НЛТУ. 2018. 28. №3. С. 117-121.
14. Фіалко Н.М., Носовський А.В., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Шараєвський І.Г., Піоро І.Л. Особливості течії надкритичної води в умовах змішаної конвекції. Промислова теплотехніка. 2018. 40. №3. С. 12-19.
15. 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.