



**Н. М. Фіалко¹, В. Г. Прокопов¹, Ю. В. Шеренковський¹, Н. О. Меранова¹, С. А. Аleshko¹, Т. С. Власенко²,
И. Г. Шараевський², Л. Б. Зимин², С. Н. Стрижеус¹, Д. П. Хміль¹**

¹ Інститут технічної теплофізики НАН України, г. Київ, Україна

² Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України, г. Київ, Україна

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ВОДЫ ПРИ ТЕЧЕНИИ В КРУГЛЫХ ОБОГРЕВАЕМЫХ ТРУБАХ

Для процесса течения сверхкритической воды в обогреваемом канале проведены исследования особенностей пространственного распределения физических свойств воды, обусловленных их существенной температурной зависимостью, характерной для сверхкритических сред в области псевдофазового перехода. На основе компьютерного моделирования решена задача тепломассопереноса в вертикальной круглой трубе при восходящем движении в ней воды сверхкритических параметров. Показано, что характер распределения свойств теплоносителя в трубе во многом определяется движением в ней фронта псевдофазового перехода. Выполнен анализ влияния величины плотности подводимого к стенке трубы теплового потока на положение границ начала и конца зоны псевдофазового перехода и на связанные с этим особенности пространственного изменения физических свойств теплоносителя. Приведены результаты CFD моделирования по распределению вдоль обогреваемой длины трубы таких свойств сверхкритической воды, как плотность, динамическая вязкость, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость. Выполнено сопоставление особенностей распределения указанных свойств, рассчитанных по температуре на стенке трубы и на ее оси. Проведены исследования характера изменения удельной теплоемкости по радиусу трубы и проанализировано влияние уровня подводимого теплового потока на положение максимума теплоемкости в различных поперечных сечениях канала.

Ключевые слова: вода сверхкритических параметров; тепломассоперенос; компьютерное моделирование; псевдофазовый переход.

Введение. Теплоэнергетика развитых стран мира в настоящее время базируется на энергоблоках сверхкритического давления, что обусловлено в первую очередь их высокой тепловой эффективностью. Термический к.п.д. таких энергоблоков может существенно – более чем на 10 % – превышать к.п.д. тепловых электростанций с докритическими параметрами. В атомной энергетике один из перспективных путей развития также связан с переходом на сверхкритические параметры, в частности, с разработкой водоохлаждаемых реакторов четвертого поколения (Zvorykin et al., 2017, Gabaraev et al.,

2006). Такой переход требует решения ряда сложных задач, среди которых в теплофизическом плане можно выделить задачу тепломассопереноса при восходящем течении сверхкритической воды в обогреваемых каналах (Zvorykin et al., 2016; Fialko et al., 2016; Fialko et al., 2016; Agranat et al., 2015).

Особенности гидродинамики и теплообмена при сверхкритических параметрах, как известно, в большой мере связаны с существенной и своеобразной зависимостью физических свойств теплоносителя от температуры (Zvorykin et al., 2017; Fialko et al., 2018).

Інформація про авторів:

Фіалко Наталія Михайлівна, д-р техн. наук, професор, член-кореспондент НАН України, завідувач відділом.

Email: nmfialko@ukr.net

Прокопов Віктор Григорович, д-р техн. наук, професор, пров. наук. співробітник. **Email:** nmfialko@ukr.net

Шеренковський Юлій Владиславович, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник, пров. наук. співробітник. **Email:** j_sher@ukr.net

Меранова Наталія Олегівна, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник, пров. наук. співробітник. **Email:** mnata1956@ukr.net

Аleshko Сергій Олександрович, канд. техн. наук, пров. наук. співробітник. **Email:** s_aleshko@ukr.net

Власенко Тетяна Станіславівна, канд. фіз.-мат. наук, завідувач відділом. **Email:** vlasenko.tata@gmail.com

Шараевський Ігор Георгійович, д-р техн. наук, ст. наук. співробітник, завідувачий сектором. **Email:** yu.sharayevskij@gmail.com

Зимин Леонід Борисович, д-р техн. наук, ст. наук. співробітник, пров. наук. співробітник. **Email:** leonid1942zimin@gmail.com

Стрижеус Світлана Миколаївна, наук. співробітник. **Email:** St.Svitlana@ukr.net

Хміль Дмитро Петрович, аспірант, мол. наук. співробітник. **Email:** S0973138620dh@gmail.com

Цитування за ДСТУ: Фіалко Н. М., Прокопов В. Г., Шеренковський Ю. В., Меранова Н. О., Аleshko С. О., Власенко Т. С.,

Шараевський І. Г., Зимин Л. Б., Стрижеус С. М., Хміль Д. П. Особливості зміни теплофізичних властивостей надкритичної води під час течії в круглих трубах, що обігріваються. Науковий вісник НЛТУ України. 2018, т. 28, № 3. С. 117–121.

Citation APA: Fialko, N. M., Prokopov, V. G., Sherenkovskiy, Yu. V., Meranova, N. O., Aleshko, S. A., et al. (2018). Specifics of Changing of the Thermophysical Properties of Supercritical Water at the Flow in Round Heating Tubes. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(3), 117–121. <https://doi.org/10.15421/40280324>

Цель работы – изучение влияния температурной зависимости физических свойств сверхкритической воды на их пространственное (по радиусу и длине трубы) распределение в канале, что является важной информацией для анализа температурного режима исследуемой системы.

Постановка задачи. Рассматривалась осесимметричная задача гидродинамики и теплопереноса в вертикально расположенной круглой трубе при подъемном течении сверхкритической воды. Внутренний диаметр трубы – 10 мм, длина обогреваемой части трубы – 4 м, массовая скорость воды – 1000 кг/(м²·с), температура воды на входе – 342 °С, давление – 24 МПа. При расчетах принимались разные значения плотности подводимого теплового потока: $q = 392$ кВт/м² (вариант 1) и $q = 826$ кВт/м² (вариант 2). Исследование проводилось на основе CFD-моделирования с использованием Fluent кода. Расчеты выполнялись на неравномерной сетке 120×520 ячеек. Детали постановки задачи особенности моделирования изложены в (Fialko et al., 2016; Fialko et al., 2017).

Изложение основного материала. Характер распределения физических свойств сверхкритической воды в обогреваемом канале в большой мере обусловлен движением в нем фронта псевдофазового перехода, определяемого изотермой $T = T_{pc}$ (где T_{pc} – температура псевдофазового перехода, соответствующая максимуму теплоемкости при данном давлении). На рис. 1 для рассматриваемых вариантов расчета показано положение фронтов начала и конца псевдофазового перехода, отвечающих зоне $\pm 25^\circ\text{C}$ вокруг температуры T_{pc} . Как следует из полученных данных, при относительно небольшой плотности подводимого теплового потока (вариант 1, см. рис. 1, а) почти во всей рассматриваемой области, за исключением узких зон, прилегающих к стенке и выходному сечению трубы, температура теплоносителя ниже T_{pc} .

В этой области теплоноситель находится в псевдожидком состоянии, и характер поведения его физических свойств остается таким же, как для жидкостей при

докритических параметрах: в частности с ростом температуры снижается его плотность ρ и динамическая вязкость μ . Именно с этим связано уменьшение по длине трубы значений плотности и вязкости на ее оси, показанное на рис. 2, 3. Однако вблизи выходного сечения ($x = x_{pc}^A = 3,85$ м) температура даже на оси трубы достигает псевдокритического значения, что приводит к экстремальному изменению в этой зоне теплоемкости (см. рис. 2) и теплопроводности (см. рис. 3).

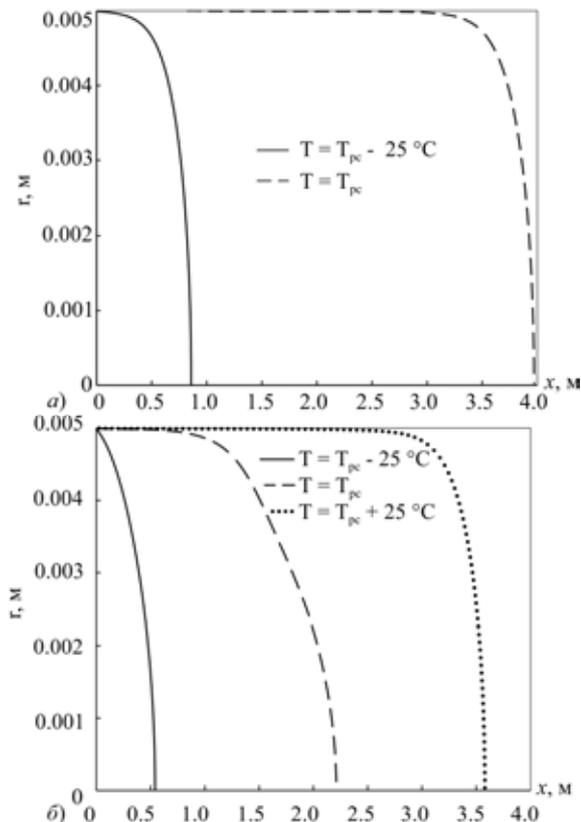


Рис. 1. Положение фронтов начала и конца псевдофазового перехода, отвечающих зоне $\pm 25^\circ\text{C}$ вокруг температуры псевдофазового перехода T_{pc} , для рассматриваемых вариантов расчетов: а) вариант 1; б) вариант 2

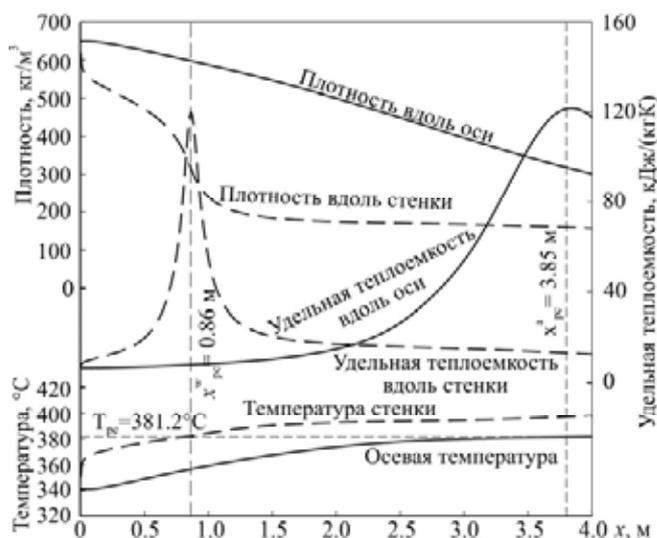


Рис. 2. Распределение плотности и удельной теплоемкости вдоль оси и стенки трубы для варианта расчетов 1

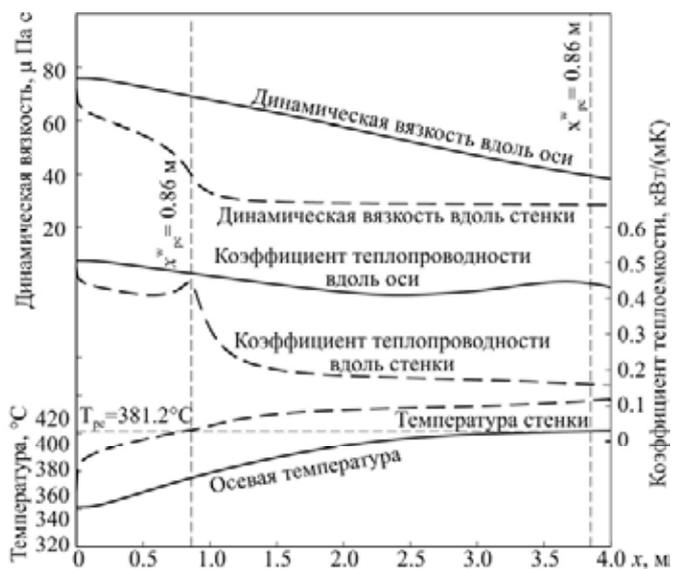


Рис. 3. Распределение динамической вязкости и коэффициента теплопроводности вдоль оси и стенки трубы для варианта расчетов 1

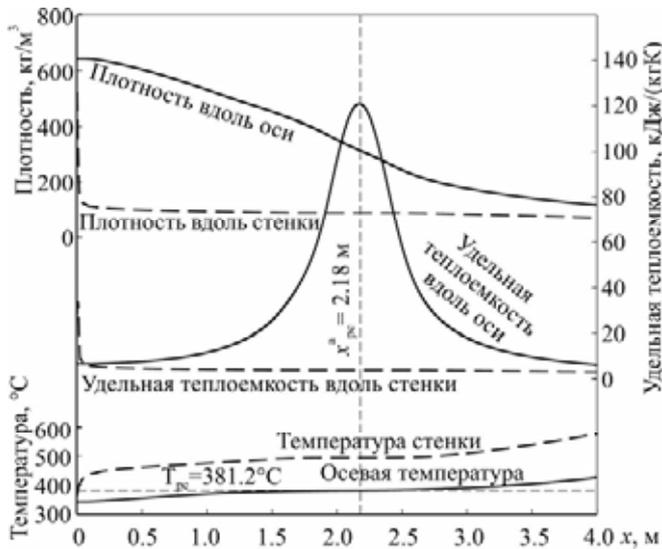


Рис. 4. Распределение плотности и удельной теплоемкости вдоль оси и стенки трубы для варианта расчетов 2

Поведение физических свойств теплоносителя вблизи стенки трубы существенно отличается от характера их изменения вдоль оси трубы, хотя и обусловлено аналогичными причинами. Температура стенки трубы достигает величины T_{pc} при существенно меньших значениях продольной координаты ($x = x_{pc}^W = 0,86$ м). В связи с этим именно здесь наблюдаются максимумы теплоемкости и теплопроводности (см. рис. 2, 3) и появляются точки перегиба на линиях изменения плотности и вязкости, обусловленные резким уменьшением их величин в области псевдофазового перехода. Следует отметить, что вниз по потоку от сечения $x = x_{pc}^W$ все указанные свойства (рассчитанные по значениям температуры стенки) изменяются незначительно.

При достаточно высокой плотности подводимого теплового потока (вариант 2, см. рис. 1, б) область между границей начала и конца псевдофазового перехода охватывают почти всю длину трубы. Положение фронта псевдофазового перехода вблизи оси трубы смещается по ее длине от конца трубы (для варианта 1) примерно к ее середине (для варианта 2). Соответственно смещаются и положения максимумов теплоемкости и теплопроводности, рассчитанные по температуре на оси трубы (рис. 4, 5). Как показали результаты расчетов, для варианта 2 температура стенки достигает величины T_{pc} в непосредственной близости от входа в обогреваемый участок трубы, в связи с чем физические свойства теплоносителя, рассчитанные по температуре стенки, испытывают именно в этой зоне резкие изменения, а на остальной части трубы изменяются незначительно (см. рис. 4, 5). Следует также отметить, что в выходной части трубы теплоноситель находится в псевдогазовом состоянии, о чем свидетельствует наблюдаемая здесь тенденция к росту динамической вязкости (см. рис. 5), характерная для газов при увеличении температуры.

На рис. 6 в качестве примера изменения физических свойств теплоносителя по сечению трубы приведено распределение удельной теплоемкости c_p по радиусу трубы для двух рассматриваемых значений теплоподвода. Как видно, положение максимума c_p в поперечном сечении трубы существенно зависит от уровня подводимого теплового потока. Так, при небольшой его вели-

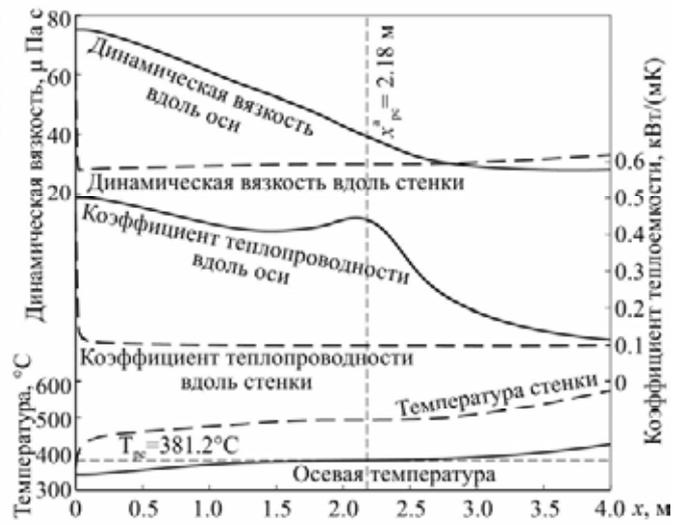


Рис. 5. Распределение динамической вязкости и коэффициента теплопроводности вдоль оси и стенки трубы для варианта расчетов 2

чине (вариант 1, см. рис. 6, а) экстремум теплоемкости почти на всей длине трубы, $x \leq 3$ м, расположен вблизи стенки и лишь на выходном участке трубы положение максимума c_p смещается к оси трубы. При достаточно большой плотности подводимого теплового потока картина иная: вблизи стенки максимум c_p имеет место лишь на начальном участке, $x \leq 1$ м, затем с ростом x максимум смещается к оси трубы и при дальнейшем увеличении продольной координаты сохраняет это положение, существенно уменьшаясь по величине (см. рис. 6, б).

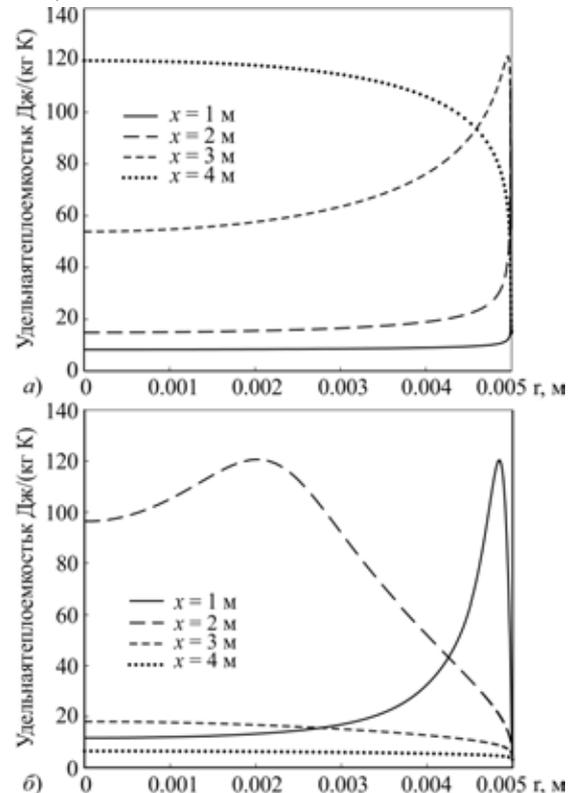


Рис. 6. Распределение удельной теплоемкости по радиусу трубы на различном расстоянии от входа в обогреваемый участок для рассматриваемых вариантов расчетов: а) вариант 1; б) вариант 2

Выводы. В заключение отметим, что описанный выше сложный характер пространственного распре-

лення фізических свойств теплоносителя в области псевдофазового перехода приводит к возникновению таких явлений, как существенное ускорение потока, переменность сил плавучести, перестройка профилей скорости и касательных напряжений, которые оказывают значительное влияние на интенсивность турбулентного переноса и определяют особенности теплообмена в канале и его температурный режим.

Перелік використаних джерел

- Agranat, V., Malin, M., Pioro, I., Abdullah, R., Perminov, V. A. (2015). CFD modeling of supercritical water heat transfer in a vertical bare tube flow. Proceeding of ICONE23 23-th Int.Conf. of Nuclear Engineering, May 17–21, Chiba, Japan, Paper#1163, 11 p.
- Fialko, N. M., Pioro, I. L., Mayson, N. V., Meranova, N. O., & Sharaevsky, I. G. (2016). Vliyaniye massovoy skorosty potoku na kharakterystyky techiyi i teploobminu v hladkykh trubakh pri nadkrytychnykh parametrah. [Influence of mass flux on flow characteristics and heat transfer in bare tubes at supercritical parameters]. *Industrial heat engineering*, 38(4), 5–13. [In Russian].
- Fialko, N. M., Pioro, I. L., Maison, N. V., & Meranova, N. O. (2016). Modelirovaniye techeniya i teploobmena v gladkikh trubakh pri sverkhkriticheskikh davleniyakh. [Modeling of flow and heat transfer in bare tubes at supercritical pressures]. *Industrial heat engineering*, 38(3), 10–17. [In Russian].
- Fialko, N. M., Pioro, I. L., Sherenkovsky, Yu. V., Maison, N. V., Meranova, N. O., & Sharaevsky, I. G. (2016). Vliyaniye teplovogo potoka na stenke kanala i davleniya vody na kharakteristiki techeniya i tep loobmena v gladkikh trubakh pri sverkhkriticheskikh parametrah. [Influence of channel wall heat flux the and water pressure on the flow and heat transfer characteristics in bare tubes at supercritical parameters]. *Industrial heat engineering*, 38(5), 5–13. [In Russian].
- Fialko, N. M., Pioro, I. L., Prokopov, V. G., Sherenkovskiy, Ju. V., Meranova, N. O., & Alioshko, S. O. (2018). CFD modelyuvannya
- teploobminu pry techiyi vody nadkrytychnykh parametriv u vertykalnykh hladkykh trubakh. [CFD modeling of heat transfer under flow of supercritical parameters water in vertical bare tubes]. *Industrial heat engineering*, 39(1), 12–20. [In Ukrainian].
- Fialko, N. M., Sherenkovsky, Yu. V., Meranova, N. O., Aleshko, S. A., Strizheus, S. N., Voitenko, A. Yu., Khmil, D. P., Brusinskaya, Ya. V., and Ostapchuk, T. S. (2017). Kharakteristiki teploobmena v vertykal'nykh trubakh pri sverkhkriticheskikh davleniyakh [Characteristics of heat transfer in vertical pipes at supercritical pressures]. Collection of works "Problems of ecology and operation of energy facilities". *Institute of Industrial Ecology*, 130–133. Kyiv: IPC ALCON NAS of Ukraine. [In Russian].
- Gabaraev, B. A., Smolin, V. N., & Solovov, S. L. (2006). Perspektivnoye napravleniye razvitiya vodookhlazhdayemykh reaktorov AES v XXI veke – ispolzovaniye sverkhkriticheskikh parametrov teploosityela. [A promising direction for the development of water cooled nuclear power reactors in the twenty-first century is the use of supercritical coolant parameters]. *Heat power engineering*, 9, 33–40. [In Russian].
- Zvorykin, A., Fialko, N., Sherenkovskiy, J., Aleshko, S., Meranova, N., Hanzha, M., Bashkir, I., Stryzheus, S., Voitenko, A., and Pioro, I. (2017) 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, 13 p. <https://doi.org/10.1115/ICONE25-66528>
- Zvorykin, A., Pioro, I., & Fialko, N. (2017). Electricity generation in the world and Ukraine: Current status and future development. *Mechanics and Advanced Technologies*, 2(80), 5–24. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2017.80.113757>
- Zvorykin, A., Fialko, N., Meranova, N., Aleshko, S., Maison, N., Voitenko, A., and Pioro, I. (2016). 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. 12 p. <https://doi.org/10.1115/ICONE24-60390>

**Н. М. Фіалко¹, В. Г. Прокопов¹, Ю. В. Шеренковський¹, Н. О. Меранова¹, С. О. Альошко¹, Т. С. Власенко²,
І. Г. Шараєвський², Л. Б. Зімін², С. М. Стрижеус¹, Д. П. Хміль¹**

¹ Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна
² Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України, м. Київ, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ЗМІНИ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАДКРИТИЧНОЇ ВОДИ ПІД ЧАС ТЕЧІЇ В КРУГЛИХ ТРУБАХ, ЩО ОБІГРІВАЮТЬСЯ

Для процесу течії надкритичної води в каналі, що обігривається, проведено дослідження особливостей просторового розподілу фізичних властивостей води, зумовлених їх істотною температурною залежністю, характерною для надкритичних середовищ у ділянці псевдофазового переходу. На основі комп'ютерного моделювання розв'язано задачу тепломасоперенесення у вертикальній круглій трубі під час висхідного руху в ній води надкритичних параметрів. Показано, що характер розподілу властивостей теплоносія у поздовжньому перетині труби певною мірою визначається рухом в ньому фронту псевдофазового переходу. Проаналізовано вплив величини густини теплового потоку, що підводиться до стінки труби, на положення границь початку і кінця зони псевдофазового переходу і на пов'язані з цим особливості просторової зміни фізичних властивостей теплоносія. Наведено результати CFD моделювання з розподілу уздовж довжини труби, що обігривається, таких властивостей надкритичної води, як густина, динамічна в'язкість, коефіцієнт теплопровідності і питома теплоємність. Виконано зіставлення особливостей розподілу зазначених властивостей, розрахованих за температурою на стінці труби і на її осі. Досліджено характер зміни питомої теплоємності по радіусу труби і проаналізовано вплив рівня теплового потоку, що підводиться, на положення максимуму теплоємності в різних поперечних перетинах каналу.

Ключові слова: вода надкритичних параметрів; тепломасоперенесення; комп'ютерне моделювання; псевдофазовий перехід.

**N. M. Fialko¹, V. G. Prokopov¹, Yu. V. Sherenkovskiy¹, N. O. Meranova¹,
S. A. Aleshko¹, T. S. Vlasenko², I. G. Sharaevskiy², L. B. Zimin², S. N. Strizheus¹, D. P. Khmil¹**

¹ Institute of Engineering Thermophysic of the NAS Ukraine, Kyiv, Ukraine

² Institute for Nuclear Safety Problems of the NAS Ukraine, Kyiv, Ukraine

SPECIFICS OF CHANGING OF THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF SUPERCRITICAL WATER AT THE FLOW IN ROUND HEATING TUBES

In the nuclear power industry, one of the promising development paths is related to the transition to supercritical parameters, in particular, to the development of water-cooled fourth-generation reactors. Such transition requires the solution of a number of complex problems, among which one can single out the problem of heat and mass transfer during the upstream flow of supercritical water in heated channels. This work is devoted to the study of the influence of the temperature dependence of the physical properties

of supercritical water on their space distribution in the channel. The axisymmetric problem of hydrodynamics and heat transfer in a vertically round tube with an upstream flow of supercritical water was considered. The internal diameter of the tube is 10 mm, the length of the heated part of the tube is 4 m, the mass flux of the water is $1000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, the inlet water temperature is 342°C , and the pressure is 24 MPa, input heat flux: $q = 392 \text{ kW}/\text{m}^2$ (option 1) and $q = 826 \text{ kW}/\text{m}^2$ (option 2). The study was conducted on the basis of CFD modeling using Fluent code. The results of the studies showed that the nature of the distribution of the physical properties of supercritical water in the heated channel is largely due to the motion of the front of the pseudo-phase transition in it and depends on the value of the heat flux. For a relatively small input heat flux, in almost the entire considered region the coolant temperature is noted to be lower than the pseudo-phase transition temperature. In this case, as for the sufficiently high input heat flux, the region between the beginning and the end of the pseudo-phase transition zone covers almost the entire length of the tube. The position of the front of the pseudo-phase transition near the tube axis is displaced along its length from the end of the tube to its middle. Accordingly, the positions of the maximum specific heat and thermal conductivity, calculated from the temperature at the axis of the tube, are displaced. The nature of the specific heat distribution along the tube radius is also analysed for the two heat transfer values considered. The position of the specific heat maximum in the cross section of the tube essentially is shown to depend on the level of the heat flux supplied. As a result of the studies, it has been defined that the above described complex character of the space distribution of the physical properties of the coolant in the region of the pseudo-phase transition leads to a significant acceleration of the flow, the variability of the buoyancy forces, the restructuring of the velocity profiles and tangential stresses.

Keywords: supercritical water; heat and mass transfer; computer simulation; pseudo-phase transition.