

**Фиалко Наталия Михайловна**

*доктор технических наук, профессор,  
член корреспондент НАН Украины, заведующая отделом  
Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Fialko Nataliia**

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

**Прокопов Виктор Григорьевич**

*доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник  
Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Prokopov Viktor**

*Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of  
National Academy of Sciences of Ukraine*

**Шеренковский Юлий Владиславович**

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
ведущий научный сотрудник*

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Sherenkovskiy Julii**

*Candidate of Technical Sciences, Senior Scientific Researcher,  
Leading Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of  
National Academy of Sciences of Ukraine*

**Алешко Сергей Александрович**

*кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник  
Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Aleshko Sergey**

*Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of  
National Academy of Sciences of Ukraine*

**Полозенко Нина Петровна**

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Polozenko Nina**

*Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of  
National Academy of Sciences of Ukraine*

**Малецкая Ольга Евгеньевна**

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Maletska Olha**

*Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of  
National Academy of Sciences of Ukraine*

**Хмиль Дмитрий Петрович**

*младший научный сотрудник*

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Khmil Dmytro**

*Junior Research*

*Institute of Engineering Thermophysics of*

*National Academy of Sciences of Ukraine*

**Шараевский Игорь Георгиевич**

*доктор технических наук, доцент, заведующий сектором*

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины*

**Sharaievskiy Ihor**

*Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Sector*

*Institute of NPP Safety Problems of NAS of Ukraine*

**Зимин Леонид Борисович**

*доктор технических наук, старший научный сотрудник,*

*ведущий научный сотрудник*

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины*

**Zimin Leonid**

*Doctor of Technical Sciences, Senior Scientific Researcher, Leading Researcher*

*Institute of NPP Safety Problems of NAS of Ukraine*

**Власенко Татьяна Станиславовна**

*кандидат физико-математических наук, заведующая отделом*

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины*

**Vlasenko Tetiana**

*PhD in Physical and Mathematical Sciences, Head of Department*

*Institute of NPP Safety Problems of NAS of Ukraine*

DOI: 10.25313/2520-2057-2021-13-7470

**ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПОДВОДИМОГО К СТЕНКЕ  
ТЕПЛОВОГО ПОТОКА НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ  
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ВОДЫ В КАНАЛАХ**

**THE INFLUENCE OF THE VALUE OF THE THERMAL  
FLUX SUPPLIED TO THE WALL ON THE SPATIAL DISTRIBUTION  
OF THE HEAT CONDUCTIVITY COEFFICIENT OF SUPERCRITICAL  
WATER IN THE CHANNELS**

**Аннотация.** Представлены результаты компьютерного моделирования по исследованию закономерностей влияния величины подводимого к системе трубы теплового потока на структуру распределения коэффициента теплопроводности сверхкритической воды в канале.

**Ключевые слова:** теплопроводность сверхкритической воды, CFD моделирование, температурные поля.

**Summary.** The paper presents the results of computer modeling for research the regularities of the influence of the value of the thermal flux supplied to the tube system on the structure of the distribution of the heat conductivity of supercritical water in the channels.

**Key words:** heat conductivity of supercritical water, CFD simulation, temperature fields.

Исследованию процессов теплопереноса в каналах активных зон перспективных ядерных реакторов со сверхкритическими параметрами посвящено большое количество работ [1–14]. Однако данные процессы все еще недостаточно изучены, и их дальнейшее исследование является актуальной задачей.

Одно из важных направлений таких исследований связано с анализом структуры пространственного распределения теплофизических свойств теплоносителя в каналах активных зон. Данные свойства претерпевают резкие, немонотонные изменения с температурой, в большей мере определяют тепловое состояние стенки каналов, и, в конечном итоге, влияют на безопасность эксплуатации реакторов.

Цель настоящей статьи заключается в установлении закономерностей структуры пространственного распределения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  сверхкритической воды в каналах при разных значениях подводимого к стенке теплового потока  $q$ .

Данные распределения определялись в результате решения нелинейной осесимметричной задачи теплопереноса при восходящем течении теплоносителя в вертикальных гладких трубах. Физическая постановка этой задачи и особенности методики ее решения описаны в [7].

Компьютерное моделирование проводилось при следующих параметрах: радиус трубы — 0,0005 м; длина обогреваемого участка трубы — 4,0 м; температура и давление на входе в канал — 323 °C и 24,0 МПа; плотность подводимого к стенке трубы теплового потока составляла 239 кВт/м<sup>2</sup> и 310 кВт/м<sup>2</sup>; температурная зависимость коэффициента теплопроводности сверхкритической воды при  $P = 24,0$  МПа приведена на рис. 1.

Характерные результаты компьютерного моделирования, отвечающие двум указанным выше значениям плотности подводимого теплового потока, представлены на рис. 2–5. Как видно из рис. 2, температурные поля сверхкритической воды в канале качественно сходны для разных значений теплового потока  $q$ . Хотя при этом имеют место и значительные количественные расхождения. Так, изотерма псевдокритического перехода, разделяющая области псевдожидкости и псевдогаза, оказывается заметно ближе расположенной к выходному сечению канала при  $q = 239$  кВт/м<sup>2</sup> (см. жирные линии на рис. 2). Меньшими в этом случае являются и уровни температуры сверхкритической воды в выходном сечении канала.

Картину полей коэффициента теплопроводности сверхкритической воды в канале для различных значений  $q$  иллюстрирует рис. 3. Данные поля, отвечающие температурным полям на рис. 2, также сходны в качественном отношении. В обоих случаях имеет место немонотонное изменение  $\lambda$  по длине канала. А именно, по мере удаления от входного сечения с ростом температуры сверхкритической воды ее коэффициент теплопроводности уменьшается. Далее вниз по потоку наблюдается локальное увеличение коэффициента  $\lambda$  в соответствии с его температурной зависимостью (рис. 1). Затем с приближением к выходному сечению канала имеет место дальнейшее уменьшение коэффициента теплопроводности воды  $\lambda$ .

Из сопоставления данных на рис. 3а и 3б следует, что область локального повышения  $\lambda$  располагается ближе ко входному сечению канала при  $q = 310$  кВт/м<sup>2</sup>. Уровень снижения  $\lambda$  в выходном сечении оказывается заметно ниже для данного значения  $q$ .

На рисунке 4 приведены распределения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  сверхкритической воды по радиусу трубы в различных поперечных сечениях канала  $x = \text{const}$  для разных значений  $q$ . Согласно полученным данным радиальные распределения  $\lambda$  при разных  $q$  могут существенно отличаться. Так, при  $q = 310$  кВт/м<sup>2</sup> в сечениях  $x = 1,9...2,7$  м эти распределения характеризуются наличием локального максимума. При этом данный максимум с ростом  $x$  смещается

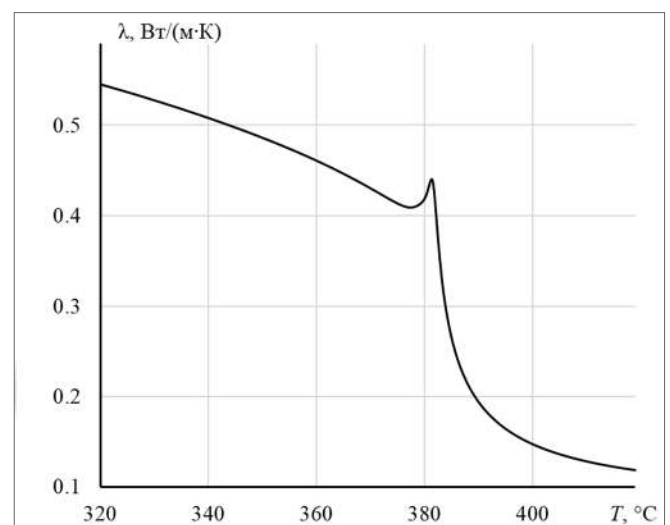


Рис. 1. Зависимость от температуры коэффициента теплопроводности сверхкритической воды при давлении 24,0 МПа

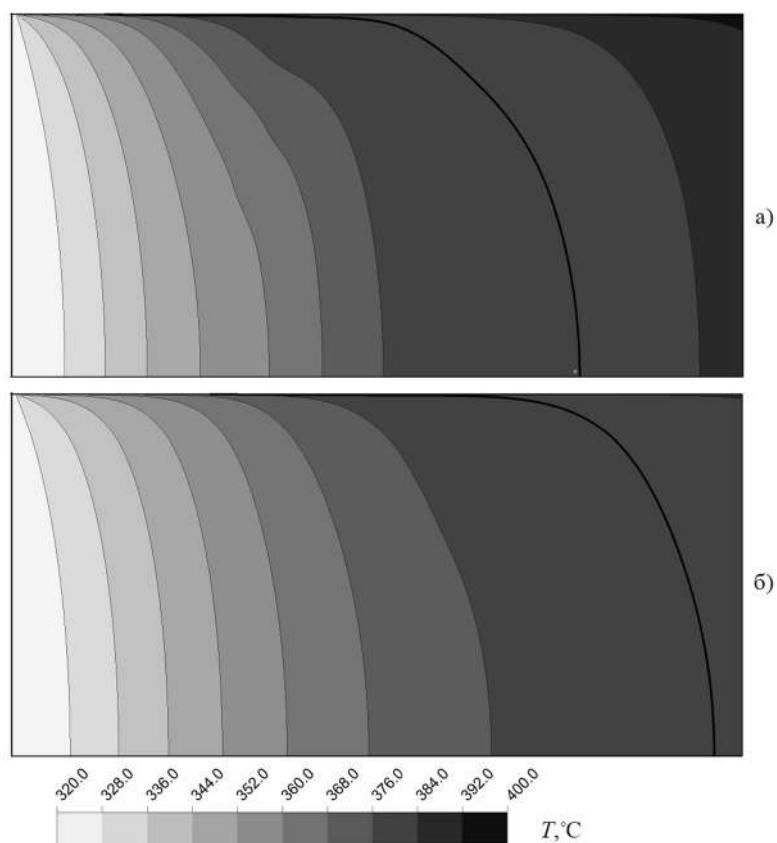


Рис. 2. Поля температуры на обогреваемом участке канала при разных значениях плотности подводимого к стенке теплового потока: а) —  $q = 310 \text{ кВт/м}^2$  б) —  $q = 239 \text{ кВт/м}^2$

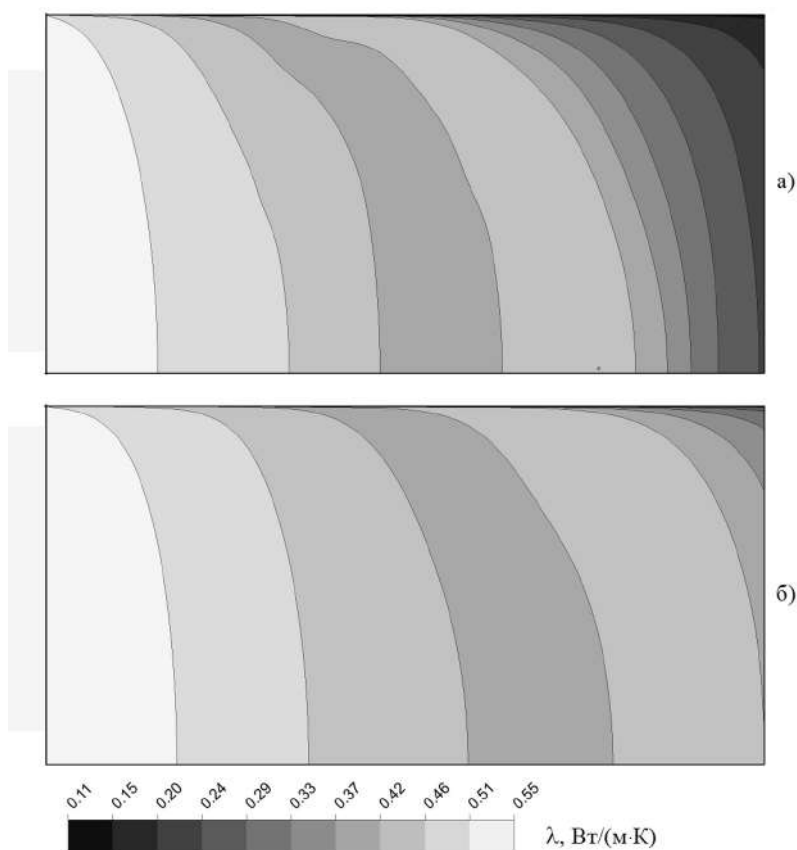
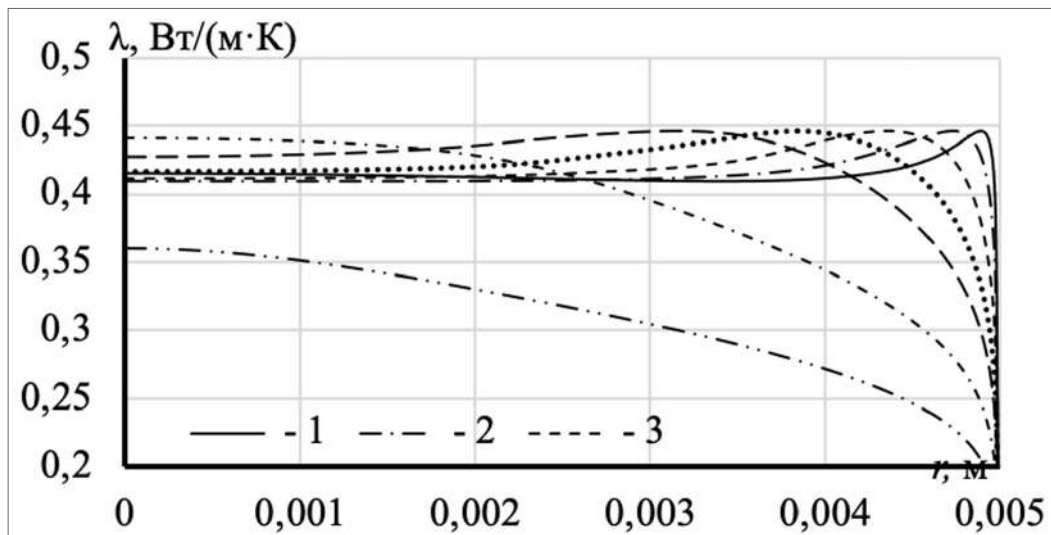
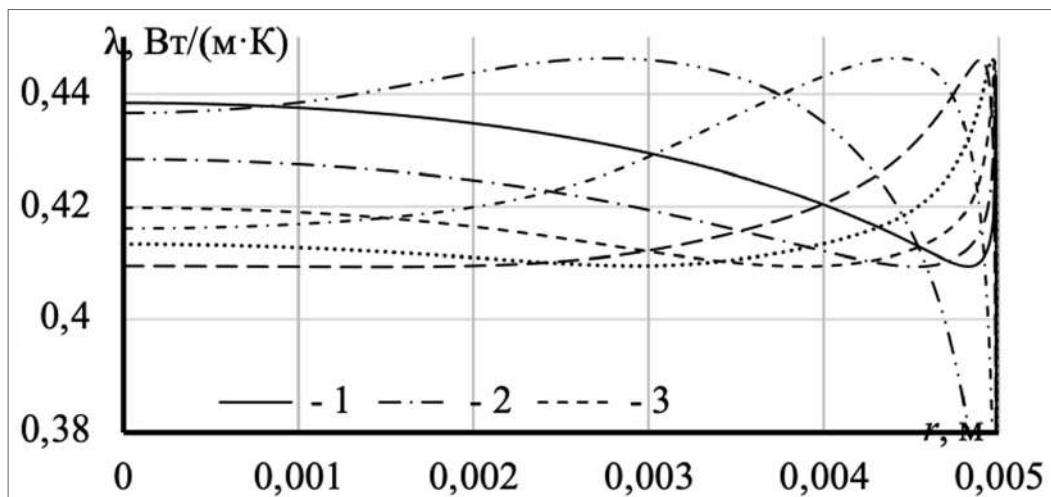


Рис. 3. Поля коэффициента теплопроводности сверхкритической воды на обогреваемом участке канала при разных значениях плотности подводимого к стенке теплового потока: а) —  $q = 310 \text{ кВт/м}^2$  б) —  $q = 239 \text{ кВт/м}^2$



а)



б)

Рис. 4. Распределение коэффициента теплопроводности сверхкритической воды по радиусу трубы для  $q = 310 \text{ кВт/м}^2$  (а) и  $q = 239 \text{ кВт/м}^2$  (б) в разных поперечных сечениях канала: 1 –  $x = 1,9 \text{ м}$ ; 2 –  $x = 2,1 \text{ м}$ ; 3 –  $x = 2,3 \text{ м}$ ; 4 –  $x = 2,5 \text{ м}$ ; 5 –  $x = 2,7 \text{ м}$ ; 6 –  $x = 3,1 \text{ м}$ ; 7 –  $x = 3,5 \text{ м}$

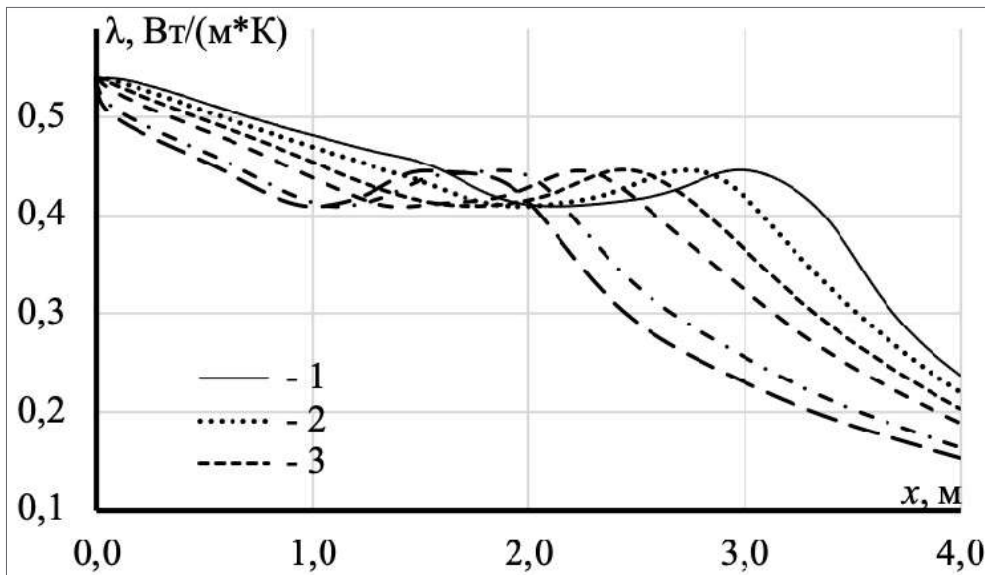
от стенки к оси канала и становится менее ярко выраженным. В сечениях  $x = 3,1$  и  $3,5 \text{ м}$  наибольшее по радиусу значения  $\lambda$  имеет место на оси канала.

При  $q = 239 \text{ кВт/м}^2$  в сечениях  $x = 1,9...2,5 \text{ м}$  рассматриваемые радиальные распределения  $\lambda$  имеют локальные минимумы, положение которых вниз по течению перемещается от стенки к ядру потока. Что же касается сечений  $x = 2,7 \text{ м}$ ,  $3,1 \text{ м}$  и  $3,5 \text{ м}$ , то здесь распределения  $\lambda$  воды по радиусу, как и при  $q = 310 \text{ кВт/м}^2$  характеризуются наличием локальных максимумов. Положения указанных максимумов отвечают пересечению плоскости  $x = \text{const}$  с изотермической поверхностью  $T_{\text{pe}}$ . Отмеченные минимумы на радиальных распределениях  $\lambda$  соответствуют месту пересечения этой плоскости с изотермической поверхностью, отвечающей температуре, при которой на кривой  $\lambda(T)$  наблюдается локальный минимум.

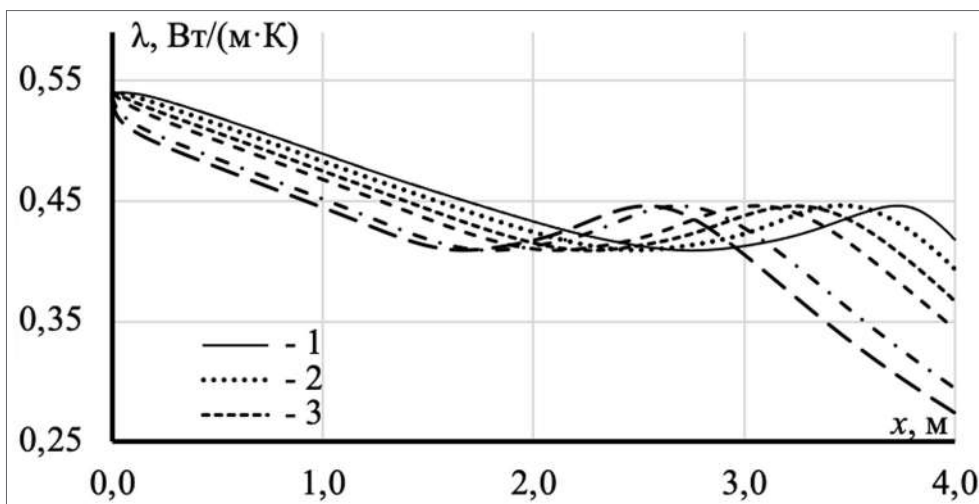
Рисунок 5 иллюстрирует распределение  $\lambda$  по длине канала в различных фиксированных точках радиуса для двух значений  $q$ . Указанные распределения качественно сходны. С ростом продольной координаты  $x$  коэффициент теплопроводности  $\lambda$  падает, достигает минимума, затем растет, достигает максимума и далее монотонно уменьшается. Чем больше значение радиуса, то есть чем ближе к стенке канала расположена рассматриваемая точка, тем раньше по течению реализуются указанные экстремумы. С ростом  $q$  положение данных экстремумов смещается вверх по потоку.

Таким образом, выполненные исследования показали, что величина теплового потока, подводимого к стенке трубы, может оказывать существенное влияние на структуру распределения коэффициента теплопроводности сверхкритической воды при ее восходящем течении в вертикальных гладких трубах.





a)



б)

Рис. 5. Распределение по длине канала коэффициента теплопроводности сверхкритической воды при  $q = 310 \text{ кВт/м}^2$  (а) и  $q = 239 \text{ кВт/м}^2$  (б) для разных значений радиуса: 1 –  $r = 0,0 \text{ м}$ ; 2 –  $r = 0,003 \text{ м}$ ; 3 –  $r = 0,004 \text{ м}$ ; 4 –  $r = 0,0045 \text{ м}$ ; 5 –  $r = 0,0049 \text{ м}$ ; 6 –  $r = 0,00495 \text{ м}$

### Литература

1. Фиалко Н. М., Пиоро И. Л., Майсон Н. В., Меранова Н. О. Моделирование течения и теплообмена в гладких трубах при сверхкритических давлениях. Промышленная теплотехника. 2016. 38. № 3. С. 10–17.
2. Zvorykin A., Fialko N., Meranova N., Aleshko S., Maison N., Voitenko A., 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 p.
3. Фиалко 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. 38. № 4. С. 5–13.
4. Zvorykina A., Pieman W., Saltanov E., Grande L., Piore I., Fialko N. Current status and future applications of supercritical pressures in power engineering. Proceedings of 20th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-20), July 30 — August 3, 2012, Anaheim, CA, USA. 13 p.
5. Шараевський І. Г., Фіалко Н. М., Носовський А. В., Зімін Л. Б., Власенко Т. С., Шараєвський Г. І. Проблемні питання теплогідрравлічного розрахунку активних зон перспективних водоохолоджуваних реакторів з надкритичними параметрами. Ядерна енергетика та довілля. 2020. № 14(19). 2020. С. 3–15.

6. Zvorykin A., Fialko N., Sherenkovskiy J., Aleshko S., Meranova N., Hanzha M., Bashkir I., Stryzheus S., Voitenko A., 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.
7. 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. Промислова теплотехніка. 2018. 40. № 1. С. 12–20.
8. Фіалко 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., Хміль Д.П. Особенности изменения теплофизических свойств сверхкритической воды при течении в круглых обогреваемых трубах. Науковий вісник НЛТУ. 2018. 28. № 3. С. 117–121.
9. 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. Промышленная теплотехника. 2018. 40. № 3. С. 12–19.
10. 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 сьогодні: пріоритетні напрямки розвитку України та Польщі». м. Воломін 19–20 жовтня 2018 р. С. 116–120. ISBN 978-9934-571-55-8.
11. Фіалко Н.М., Піоро І.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. 38. № 5. С. 5–13.
12. 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.
13. 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 pages.
14. Фіалко Н.М., Носовський А.В., Піоро І.Л., Шеренковський Ю.В., Меранова 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.