

Технические науки

УДК 536.242

**Фиалко Наталия Михайловна**

*доктор технических наук, профессор, член корреспондент НАН Украины,  
Заслуженный деятель науки и техники Украины, заведующая отделом  
Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Fialko Nataliia**

*Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Corresponding Member of NAS of Ukraine,  
Honored Worker of Science and Technology 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*

**Меранова Наталия Олеговна**

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

**Meranova Nataliia**

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

**Алёшко 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*

**Кутняк Ольга Николаевна**

*научный сотрудник,  
Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Kutnyak Olha**

*Researcher  
Institute of Engineering Thermophysics of  
National Academy of Sciences of Ukraine*

**Хмилъ 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*

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ВОДЫ В  
ОБОГРЕВАЕМЫХ ГЛАДКИХ ТРУБАХ  
REGULARITIES OF SPATIAL DISTRIBUTION OF HEAT  
CONDUCTIVITY OF SUPERCRITICAL WATER IN HEATED BARE  
TUBES**

***Аннотация.** Представлены результаты исследования полей теплопроводности сверхкритической воды при ее восходящем течении в вертикальных каналах.*

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

***Summary.** The results of studying the fields of thermal conductivity of supercritical water during its ascending flow in vertical channels are presented.*

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

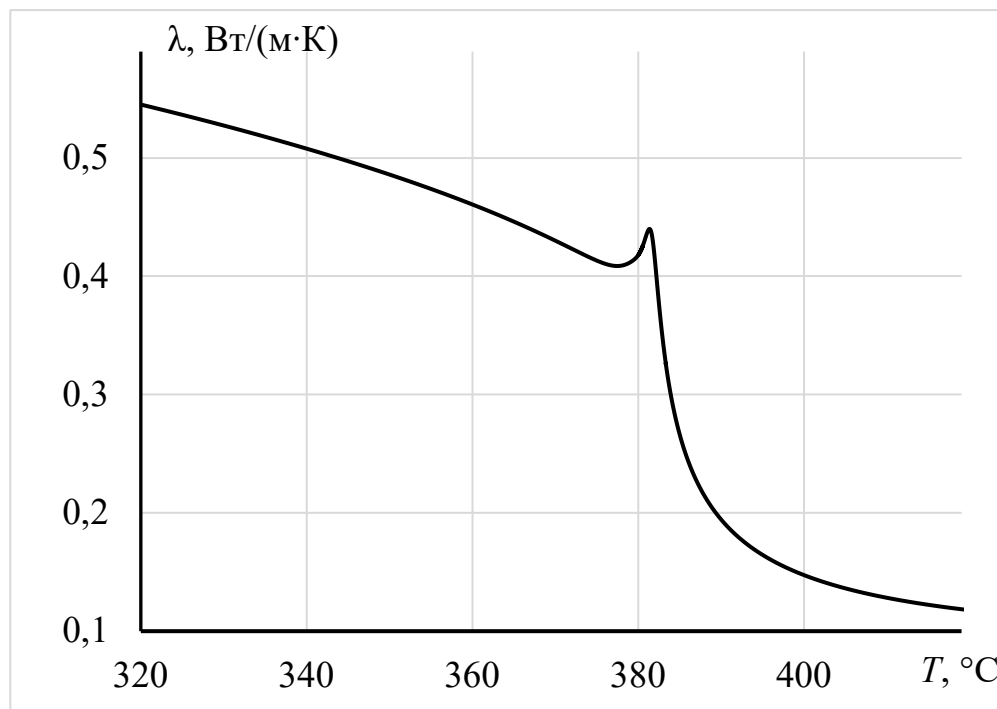
Актуальные проблемы обеспечения теплогидравлической надежности перспективных ядерных реакторов со сверхкритическими параметрами непосредственно связаны с решением ряда задач реакторной теплофизики [1-15]. Одной из таких задач является исследование структуры распределения теплофизических свойств сверхкритической воды в каналах для движения теплоносителя в активной зоне. Данные свойства в рассматриваемых условиях, как известно, претерпевают существенные изменения и в большой мере определяют характеристики течения и теплообмена.

Настоящая статья посвящена анализу пространственной картины распределения теплопроводности сверхкритической воды при ее восходящем течении в вертикальных гладких трубах.

На рисунке 1 представлена зависимость  $\lambda = f(T)$  для сверхкритической воды. Как видно, в рассматриваемом температурном интервале коэффициент теплопроводности сверхкритической воды меняется примерно в пять раз. При этом в целом имеет место тенденция к падению  $\lambda$  с ростом температуры. Относительно небольшое локальное повышение коэффициента теплопроводности воды имеет место лишь в области псевдокритического перехода «псевдожидкость-псевдогаз». Обращает на себя внимание также тот факт, что существенно более значительное понижение  $\lambda$  с увеличением температуры наблюдается в области температур выше температуры псевдокритического перехода  $T_{pc}$ . Приведенные на рис. 1 температурные зависимости теплопроводности воды учитывались при решении задачи о картине распределения  $\lambda$  в канале.

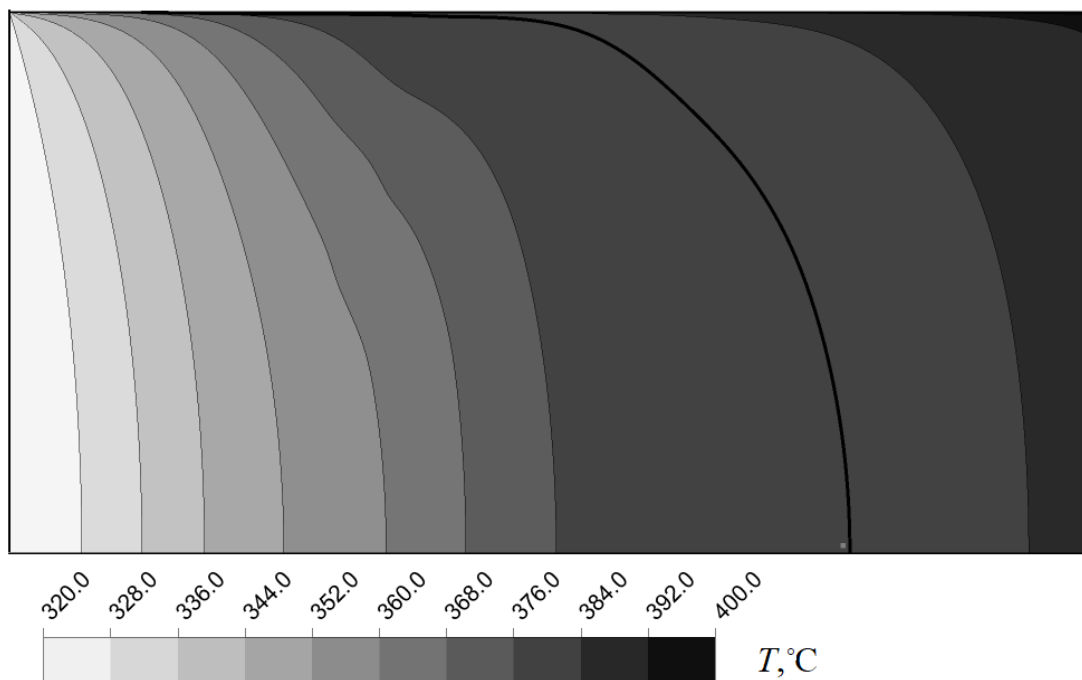
Построение указанных распределений коэффициента теплопроводности сверхкритической воды осуществлялось по температурным полям, найденным в результате решения соответствующей задачи теплопереноса. Детальная постановка этой задачи, отвечающей условиям смешанной конвекции при тчении сверхкритической воды в трубе приведена в [7]. Здесь же описаны особенности численной реализации решения задачи.

Ниже, на рис. 2, 3 представлены характерные результаты CFD моделирования при таких исходных параметрах: длина предвключенного необогреваемого участка трубы – 1,2 м; длина обогреваемого участка трубы – 4,0 м; диаметр трубы – 0,001 м; температура и давление во входном сечении канала – 323 °С и 24,0 МПа; плотность теплового потока, подводимого к стенке трубы на ее обогреваемом участке – 310 кВт/м<sup>2</sup>.



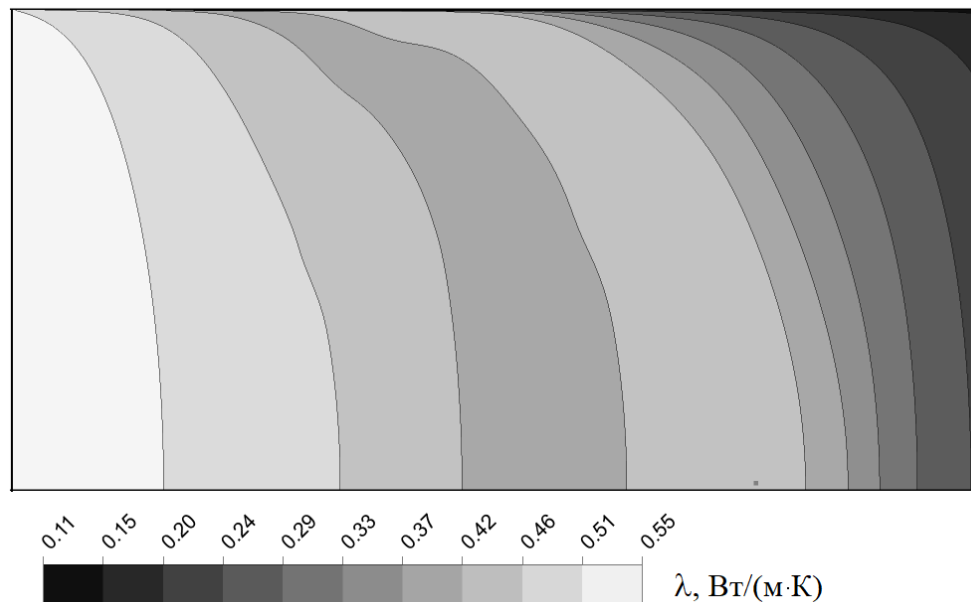
**Рис. 1. Зависимость от температуры коэффициента теплопроводности сверхкритической воды при давлении 24,0 МПа**

Рисунок 2 иллюстрирует поле температур в канале. (Здесь для удобства представленная радиальная координата увеличена в 400 раз. Изотерма, отвечающая псевдокритической температуре  $T_{pc}$ , обозначена на рисунке жирной линией). Согласно приведенным данным, псевдокритический переход «псевдожидкость-псевдогаз», отвечающий изотерме  $T_{pc}$ , наблюдается на достаточно большом удалении от входного сечения канала ( $x_{pc} = 3,08$  м, где  $x_{pc}$  – координата, отвечающая пересечению изотермой  $T_{pc}$  оси трубы). Как видно из рис. 2, на начальном участке трубы наблюдается весьма резкое возрастание температуры. Далее вниз по течению данный рост замедляется.



**Рис. 2. Поле температуры на обогреваемом участке канала**

На рисунке 3 представлено поле коэффициента теплопроводности сверхкритической воды в канале. Картина приведенного поля  $\lambda$  свидетельствует о том, что пространственное распределение коэффициента теплопроводности в канале носит немонотонный характер. Как видно, на значительном участке трубы, прилежащем к ее входному сечению,  $\lambda$  сверхкритической воды вниз по течению увеличивается (изображение поля на рисунке становится более темным). Однако, далее с ростом продольной координаты имеет место зона локального повышения  $\lambda$ , что отвечает подобласти, в которой температура воды увеличивается от значения соответствующего локальному минимуму на кривой  $\lambda = f(T)$  до локального максимума. (На рисунке 3 указанная зона повышения  $\lambda$  представлена светлым участком, который следует за прилежащей ко входу в канал подобластью, изображенной с постоянным по потоку затемнением).



**Рис. 3. Поле коэффициента теплопроводности сверхкритической воды на обогреваемом участке канала**

За зоной увеличения коэффициента теплопроводности вниз по потоку следует участок, где  $\lambda$  претерпевает дальнейшее падение в соответствии с повышением температуры потока (соответственно поля на рисунке вблизи выходного сечения канала характеризуются более интенсивным затемнением).

Таким образом, в результате проведенных исследований выполнен анализ основных особенностей полей коэффициента теплопроводности сверхкритической воды при ее восходящем течении в вертикальных гладких трубах.

### 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., and Pioro I. Computer Simulation of Flow and Heat Transfer in Bare Tubes at Supercritical Parameters. Proceedings of the 24<sup>th</sup> International Conference On Nuclear Engineering (ICONE-24), June 26-30, Charlotte, NC, USA, Paper #60390, 2016. 12 p.
3. Фіалко Н.М., Піоро І.Л., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Шараєвський І.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., Pioro I., Fialko N. Current status and future applications of supercritical pressures in power engineering. Proceedings of 20<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-20), July 30 – August 3, 2012, Anaheim, CA, USA. 13 p.
5. Шараєвський І.Г., Фіалко Н.М., Носовський А.В., Зімін Л.Б., Власенко Т.С., Шараєвський Г.І. Проблемні питання теплогідравлічного розрахунку активних зон перспективних водоохолоджуваних реакторів з надкритичними параметрами. Ядерна енергетика та довкілля. 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. 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., Хмил 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 сьогодення: пріоритетні напрямки розвитку України та Польщі». м. Воломін 19-20 жовтня 2018 р. С. 116-120. ISBN 978-9934-571-55-8.
  11. Фиалко 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. 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 p.

14. 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.