

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

**ПОЛЯ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ВОДЫ
ПРИ ЕЕ ТЕЧЕНИИ В КАНАЛАХ
FIELDS OF SPECIFIC HEAT CAPACITY OF SUPERCRITICAL WATER
FLOWING IN CHANNELS**

Аннотация. Приводятся данные CFD анализа полей удельной теплоемкости сверхкритической воды в круглых каналах при разных значениях подводимого к стенке теплового потока.

Ключевые слова: CFD моделирование, теплоемкость сверхкритической воды, смешанная конвекция.

Summary. The data of CFD analysis of the specific heat capacity fields of supercritical water in round channels at different values of the heat flux supplied to the wall are presented.

Key words: CFD simulation, heat capacity of supercritical water, mixed convection.

В последний период в атомной энергетике рассматривается возможность перехода на сверхкритические параметры. Это обуславливает необходимость решения ряда актуальных задач реакторной теплофизики (см., например, [1-14]). К важным относятся, в частности, исследования, касающиеся пространственного распределения физических свойств сверхкритической воды при ее течении в обогреваемых каналах.

Данная статья посвящена исследованию особенностей полей удельной теплоемкости сверхкритической воды в вертикальных каналах.

Рассматриваемой физической ситуации отвечает осесимметричная задача смешанной конвекции. Гидродинамическая стабилизация течения на входе в канал обеспечивалась путем установки перед ним необогреваемого

участка длиной $L_{но}$. На входе в канал задавались постоянные значения температуры T_{ex} , давление P_{ex} и массовой скорости G . В выходном сечении канала принимались «мягкие» граничные условия. На обтекаемой водой поверхности трубы граничные условия задавались следующим образом: условия адиабатичности на обогреваемом участке трубы и условия постоянства подводимого теплового потока q – на обогреваемом участке.

Поставленная задача решалась с использованием пакета FLUENT. В качестве модели турбулентного переноса принималась $k-\omega$ SST модель турбулентности.

Компьютерное моделирование проводилось при следующих исходных данных: диаметр канала – 0,001 м; длина необогреваемого участка трубы $L_{но} = 1,2$ м, длина обогреваемого участка $L_o = 4,0$ м; $T_{ex} = 323$ °С; $P_{ex} = 24,0$ МПа; интенсивность турбулентности на входе в канал составляла 3,0 %; плотность теплового потока q равнялась 239 кВт/м² и 310 кВт/м².

Характерные результаты выполненных исследований приведены на рис. 1, 2. Рис. 1 иллюстрирует поля удельной теплоемкости сверхкритической воды для двух значений подводимого теплового потока. На рис. 2 представлены конфигурации изотерм псевдокритического перехода для этих значений q . Температурная зависимость удельной теплоемкости c_p сверхкритической воды при рассматриваемых условиях приведена на рис. 3.

Как видно из рис. 3, температурная зависимость теплоемкости c_p имеет ярко выраженный экстремальный характер. При этом экстремум c_p отвечает температуре псевдокритического перехода T_{pc} . (Последний в рассматриваемых условиях составляет 381,4 °С). Таким образом, на полях теплоемкости c_p ее максимальные значения должны отвечать расположению изотерм T_{pc} .

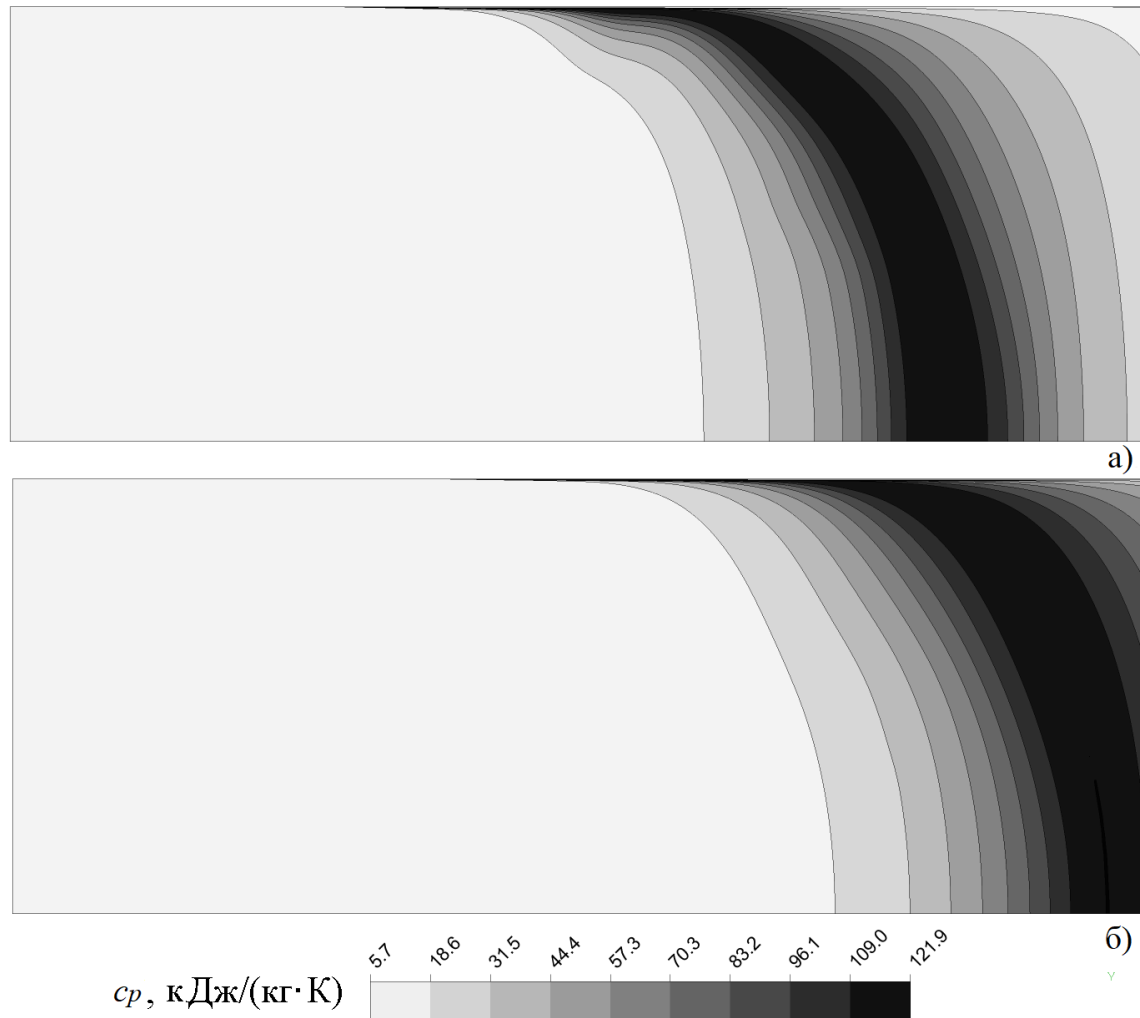
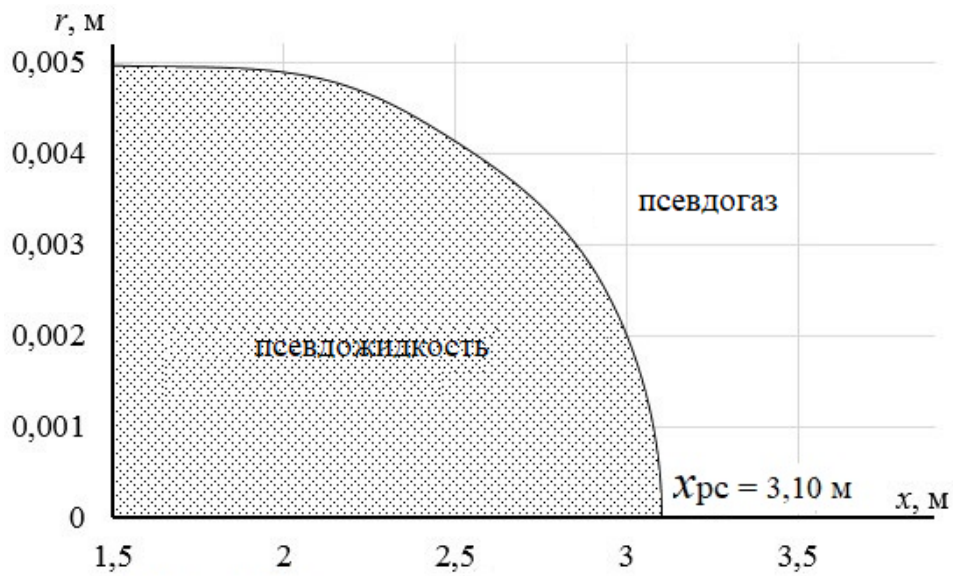


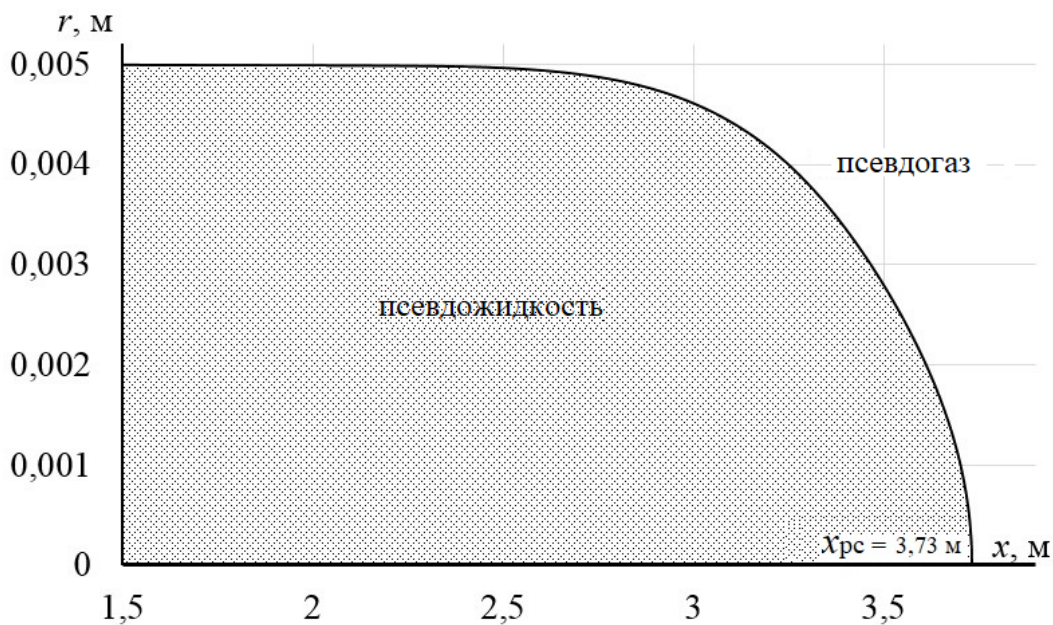
Рис. 1. Поля удельной теплоемкости c_p сверхкритической воды в канале при разных значениях подводимого к стенке теплового потока:

а) - $q = 310 \text{ кВт/м}^2$; б) - $q = 239 \text{ кВт/м}^2$

Изотермы T_{pc} разделяют область течения на две зоны (рис. 2). Зона вверх по потоку от данной изотермы отвечает псевдожидкому состоянию сверхкритической воды, зона, расположенная вниз по потоку от нее — псевдогазовому состоянию. Соответственно в этих зонах значения c_p являются относительно небольшими. Исключение составляет подобласть вблизи изотермы T_{pc} , где по мере приближения к ней наблюдается весьма резкий рост удельной теплоемкости c_p .



а)



б)

Рис. 2. Конфигурация изотерм псевдокритического перехода при разных значениях подводимого к стенке теплового потока: а) - $q = 310 \text{ кВт/м}^2$; б) - $q = 239 \text{ кВт/м}^2$

Согласно данным, приведенным на рис. 1, описанная картина полей теплоемкости c_p в канале действительно имеет место. Здесь обращает на себя внимание следующее обстоятельство. Поля теплоемкости сверхкритической

воды при разных значениях плотности подводимого к стенке теплового потока q заметно отличаются (сопоставьте данные на рис. 1а и 1б). А именно, большим значениям q (рис. 1а) отвечают меньшие размеры зоны, где сверхкритическая вода находится в псевдожидком состоянии, и соответственно большие размеры зоны, в которой она отвечает псевдогазовому состоянию.

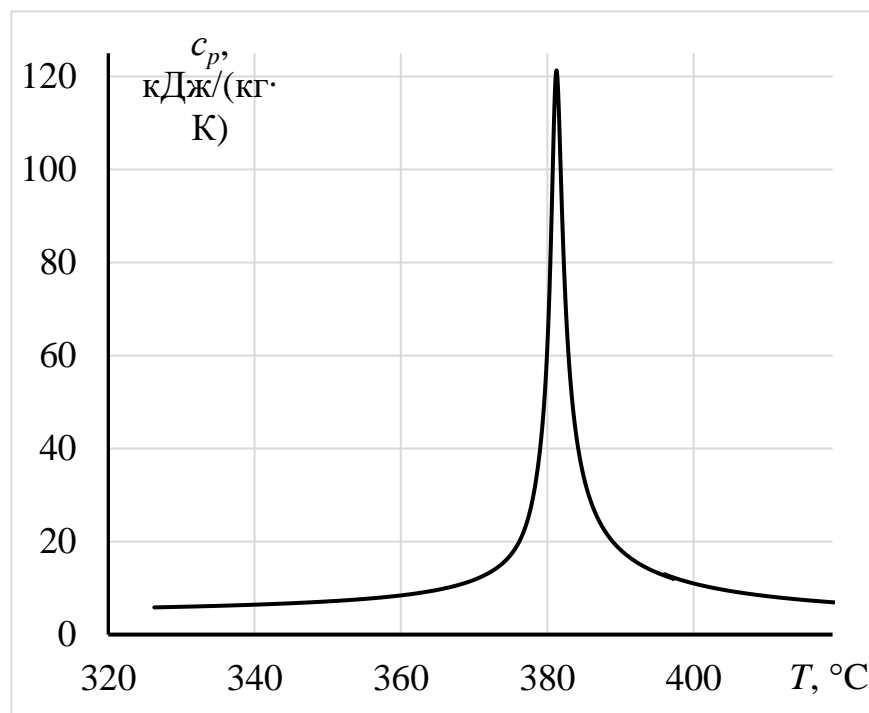


Рис. 3. Зависимость от температуры удельной теплоемкости сверхкритической воды при $P = 24$ МПа

Таким образом, на основе выполненного CFD моделирования течения и теплообмена сверхкритической воды в вертикальных каналах, установлены основные закономерности изменения полей удельной теплоемкости c_p при разных значениях плотности подводимого к стенке теплового потока.

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., 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.
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., Pioro 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. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Алешко С.А., Стрижеус С.Н., Войтенко А.Ю., Хмиль 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.
6. 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, 2017. Paper #66528. 13 p.
7. Фіалко Н.М., Пиоро 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., Хмиль 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., 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.