

Технические науки

УДК 536.24:533

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*

Шеренковский Юлий Владиславович

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

Sherenkovskiy Julii

*Candidate of Technical Sciences (PhD),
Senior Scientific Researcher, 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 (PhD),
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 Serhii

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

Хмил 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*

Носовский Анатолий Владимирович

*доктор технических наук, профессор,
академик НАН Украины, директор Института
Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины*

Nosovskyi Anatolii

*Doctor of Technical Sciences, Professor,
Academician of the NAS of Ukraine, Head of Institute
Institute of NPP Safety Problems of NAS 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*

Пиоро Игорь Леонардович

доктор технических наук, профессор

Факультет энергетических систем и ядерных наук

Технологический институт Университета Онтарио

Pioro Ihor

Doctor of Technical Sciences, Professor

Faculty of Energy Systems and Nuclear Science

University of Ontario Institute of Technology

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ПЛОТНОСТИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ВОДЫ ПРИ ВОСХОДЯЩЕМ
ТЕЧЕНИИ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ОБОГРЕВАЕМЫХ ТРУБАХ
STUDY OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF THE SUPERCRITICAL
WATER DENSITY IN AN UPWARD FLOW IN VERTICAL HEATED
TUBES**

Аннотация. *Представлены данные CFD моделирования пространственных распределений плотности сверхкритической воды при ее течении в вертикальных гладких трубах в условиях смешанной конвекции. Рассмотрены эффекты влияния сил плавучести на указанные распределения.*

Ключевые слова: *плотность, сверхкритическая вода, математическое моделирование, смешанная конвекция.*

Summary. *The data of CFD modeling of spatial distributions of density of supercritical water during its flow in vertical smooth pipes under conditions of mixed convection are presented. The effects of the influence of buoyancy forces on the indicated distributions are considered.*

Key words: *density, supercritical water, mathematical modeling, mixed convection.*

В последний период значительное внимание уделяется исследованиям течения и теплообмена воды в каналах при сверхкритических параметрах [1-14]. Это обусловлено, в частности, тенденциями развития атомной энергетики.

Физическая постановка соответствующей задачи отвечает задаче смешанной конвекции при существенной зависимости физических свойств воды от температуры. Данная зависимость в большой мере определяет характер течения и теплообмена в каналах. В этой связи представляет интерес исследование плотности сверхкритической воды при ее восходящем течении в гладких трубах.

Настоящая работа посвящена исследованию на основе математического моделирования пространственной картины распределения плотности сверхкритической воды в указанных условиях.

В качестве объекта теплофизических исследований рассматриваемая ситуация соответствует задаче смешанной конвекции (при вынужденном и свободном движении) в условиях существенной зависимости свойств жидкости от температуры. В работе данная задача решалась в двумерной осесимметричной постановке. С целью стабилизации течения перед входом в трубу расчетная область увеличивалась вверх по потоку за счет необогреваемого начального участка длиной 1,2 м. Во входном сечении трубы скорость и температура принимались постоянными, а величина интенсивности турбулентности Tu была равной 3%. В выходном сечении трубы ставились «мягкие» граничные условия. На обтекаемых водой поверхностях трубы задавались условия прилипания. На необогреваемом

участке трубы в качестве тепловых принимались условия адиабатичности, на обогреваемом участке – условия постоянного по длине трубы теплоподвода к ее стенке. Расчетная область покрывалась неравномерной сеткой с существенным сгущением у стенок трубы и содержала 120x520 ячеек. Пристеночный шаг задавался равным $1,5 \cdot 10^{-6}$ м, что обеспечивало значение $y^+ < 0,7$. Для определения физических свойств сверхкритической воды использовалась программа NIST REFPROP, интегрированная в FLUENT код [15]. Решение поставленной задачи осуществлялось с двойной точностью.

При решении использовалась $k-\omega$ SST модель турбулентности. Результаты верификации моделей турбулентности приведены в [3].

Ниже представлены результаты математического моделирования, отвечающие следующим исходным параметрам: массовая скорость $G = 500$ кг/(м²·с); давление на входе в канал $P_{\text{вх}} = 24$ МПа; температура на входе $T_{\text{вх}} = 323$ °С. Исследования проводились при разных значениях плотности теплового потока: $q = 239$ кВт/м²; 263 кВт/м²; 287 кВт/м² и 310 кВт/м². На рис. 1 приведена температурная зависимость плотности сверхкритической воды при $P = 24$ МПа согласно данным [15].

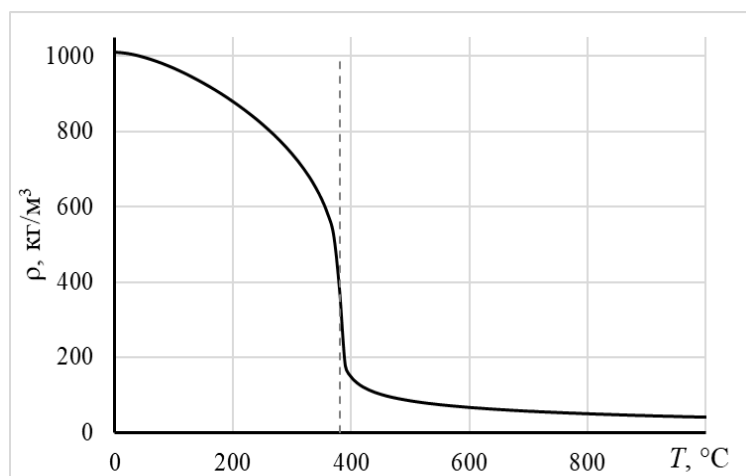


Рис. 1. Температурная зависимость плотности воды при давлении $P = 24$ МПа

Рисунок 2 иллюстрирует результаты CFD моделирования по распределению плотности сверхкритической воды вдоль радиуса трубы при разных значениях плотности подводимого теплового потока q на различном расстоянии x от входа в обогреваемый участок трубы. Здесь рис. 2 а, б, в отвечают наличию учета сил плавучести, рис. 2 г, д, е – отсутствию такого учета при компьютерном моделировании расчетной физической ситуации.

Радиальные распределения плотности сверхкритической воды определяются соответствующими профилями температуры. Более высоким температурам у стенки трубы отвечают меньшие значения плотности сверхкритической воды. Пониженным температурам в ядре потока соответствуют большие величины плотности воды. Описанный характер профилей плотности имеет место как в случае наличия, так и отсутствия учета сил плавучести в соответствующей математической модели (рис. 2).

Что касается зависимости данных профилей от плотности подводимого теплового потока q , то, как свидетельствуют полученные данные, чем больше q , тем меньше плотность сверхкритической воды в фиксированном поперечном сечении трубы.

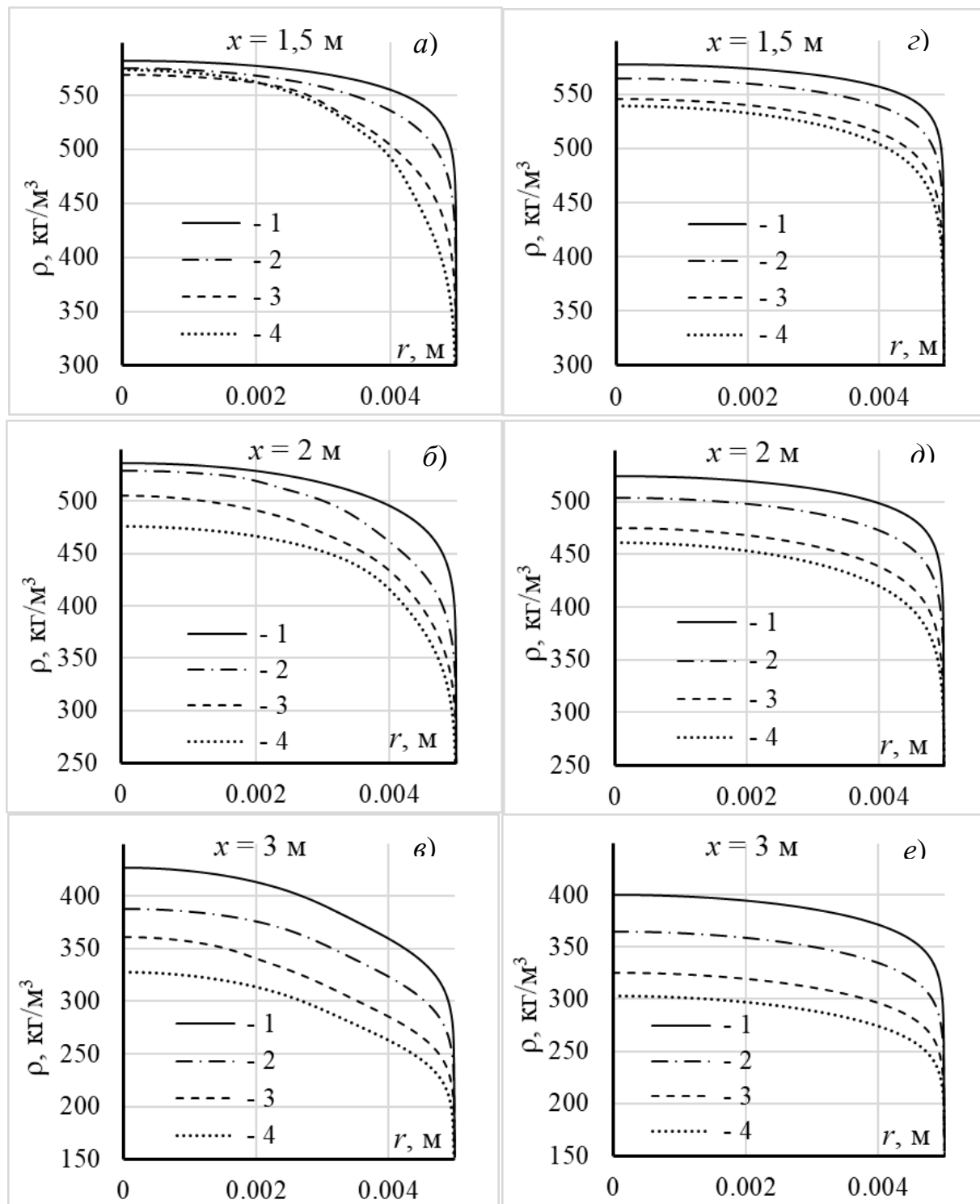


Рис. 2. Профили плотности воды в радиальном направлении на различном расстоянии x от ее входа в обогреваемый участок трубы при учете (а, б, в) и без учета (з, д, е) сил плавучести для различных значений плотности подводимого теплового потока q : 1 – $q = 239 \text{ кВт}/\text{м}^2$; 2 – $q = 263 \text{ кВт}/\text{м}^2$; 3 – $q = 287 \text{ кВт}/\text{м}^2$; 4 – $q = 310 \text{ кВт}/\text{м}^2$

При этом данная тенденция проявляется менее существенно вблизи входа в обогреваемый участок трубы. К тому же здесь указанное влияние теплового потока q на плотность воды локализуется в подобласти, прилежащей к стенке трубы. Вниз по потоку влияние q распространяется и на область ядра потока.

Согласно результатам выполненных исследований наблюдаются определенные отличия в значениях плотности сверхкритической воды при моделировании рассматриваемой физической ситуации с учетом и без учета сил плавучести. А именно, в фиксированном сечении трубы $x = const$, модель с учетом сил плавучести отвечает большим значениям плотности в ядре потока и меньшим – вблизи стенки трубы. То есть радиальные профили плотности являются более заполненным при отсутствии учета сил плавучести.

Описанные отличия в распределении плотности сверхкритической воды при наличии и отсутствии учета сил плавучести определяются соответствующими отличиями в температурных профилях. Действительно, температуры, отвечающие наличию сил плавучести, оказываются более высокими вблизи стенки трубы и меньшими – вблизи ее оси. Повышенные уровни температур вблизи стенки трубы, как известно, обусловлены угасанием турбулентного переноса, связанным с естественной конвекцией. Ввиду этого отвод теплоты к ядру потока оказывается затрудненным и температуры здесь являются более низкими, чем при отсутствии учета естественной конвекции.

Выводы. На основе математического моделирования получены данные о пространственном распределении плотности сверхкритической воды при ее восходящем течении в вертикальных гладких трубах. При этом выполнено сопоставление CFD предсказаний, отвечающих наличию и отсутствию учета

сил плавучести. Исследованы эффекты влияния плотности подводимого теплового потока на рассматриваемые распределения плотности сверхкритической воды.

Литература

1. 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.
2. 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.
3. 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.
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, 2012. 13 p.
5. 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.
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, Paper #66528, 2017. 13 p.
 7. 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.
 8. 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 .
 9. 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.
 10. 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.
 11. 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.

12. 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.
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., 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.
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.