

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*

**Sharaievskyi 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*

**УЧЕТ СИЛ ПЛАВУЧЕСТИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕЧЕНИЯ  
СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ВОДЫ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБАХ  
CONSIDERATION OF BUOYANCE FORCES WHEN SIMULATING  
SUPERCRITICAL WATER FLOW IN VERTICAL TUBES**

**Аннотация.** *Представлены результаты компьютерного моделирования течения сверхкритической воды в трубах. Исследованы закономерности влияния сил плавучести на характеристики течения.*

**Ключевые слова:** *сверхкритическая вода, силы плавучести, компьютерное моделирование.*

**Summary.** *The results of computer simulation of supercritical water flow in tubes are presented. The regularities of the influence of buoyancy forces on the flow characteristics are investigated.*

**Key words:** *supercritical water, buoyancy forces, computer simulation.*

Одно из перспективных направлений развития атомной энергетики связано с переходом на сверхкритические параметры. Это обуславливает актуальность проведения исследований течения и теплообмена

сверхкритической воды применительно к данным условиям [1-14]. При этом особый интерес представляет CFD моделирование указанных процессов, позволяющее прогнозировать их локальные характеристики.

Данное исследование посвящено CFD моделированию течения сверхкритической воды в вертикальных гладких трубах в условиях смешанной конвекции. Особое внимание в работе уделяется сопоставлению данных моделирования, отвечающих наличию и отсутствию учёта сил плавучести.

Решению подлежала осесимметричная задача течения при наличии вынужденного и свободного движения сверхкритической воды. Гидродинамическая стабилизация течения на входе в канал обеспечивалась за счет установки перед ним необогреваемого участка длиной 1,2 м (рис.1). На входе в трубу задавалась постоянная величина массовой скорости  $G$ , давления  $P_{ex}$  и температуры  $T_{ex}$ . На выходе из трубы принимались мягкие граничные условия. По длине обогреваемого участка трубы задавались постоянные значения плотности теплового потока  $q$ , подводимого к стенке. Математическое моделирование проводилось при следующих неварьируемых исходных данных: внутренний диаметр трубы  $D = 0,01$  м; длина обогреваемого участка трубы  $L = 4,0$  м; интенсивность турбулентности на входе в трубу  $Tu_{ex} = 3\%$ .

Ниже приводятся результаты расчетов для четырех вариантов CFD моделирования. Первый из них отвечает таким исходным параметрам:  $q = 239$  кВт/м<sup>2</sup>;  $G = 496$  кг/(м<sup>2</sup>·с);  $P_{ex} = 24,0$  МПа;  $T_{ex} = 323$  °С; второй –  $q = 263$  кВт/м<sup>2</sup>;  $G = 496$  кг/(м<sup>2</sup>·с);  $P_{ex} = 24,0$  МПа;  $T_{ex} = 323$  °С; третий –  $q = 287$  кВт/м<sup>2</sup>;  $G = 494$  кг/(м<sup>2</sup>·с);  $P_{ex} = 24,2$  МПа;  $T_{ex} = 325$  °С; четвертый –  $q = 310$  кВт/м<sup>2</sup>;  $G = 496$  кг/(м<sup>2</sup>·с);  $P_{ex} = 24,0$  МПа;  $T_{ex} = 323$  °С

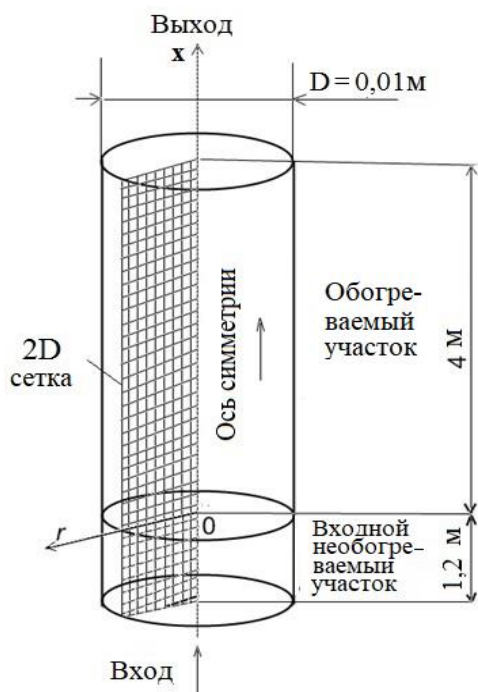


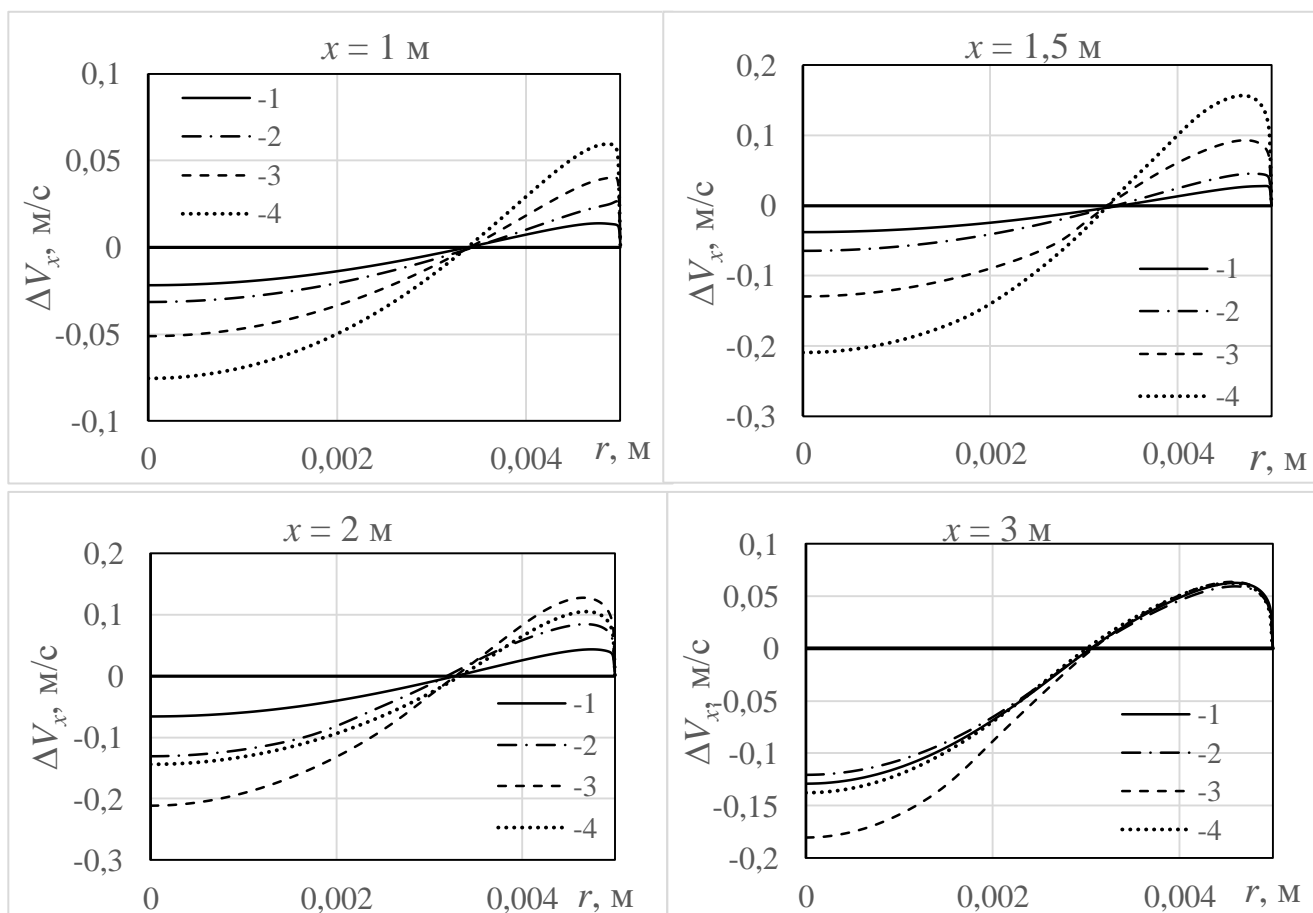
Рис. 1. К постановке задачи

Согласно полученным данным для всех рассмотренных значений плотности теплового потока, подводимого к стенке трубы, на её центральном по длине участке наблюдаются М-образные профили скорости. Это свидетельствует о наличии на данном участке режима смешанной конвекции. Что касается профилей скорости на входном и выходном участках трубы, то они близки к усечённым параболам, что характерно для режима вынужденного течения жидкости.

Из анализа полученных данных следует, что локализация по длине трубы подобластей с М-образным профилем скорости определяется величиной  $q$  подводимого теплового потока. Чем больше  $q$ , тем раньше по длине трубы возникают М-образные профили скорости.

На рис. 2 представлены профили величины  $\Delta V_x$ , представляющей собой разницу скоростей  $V_x$ , отвечающих наличию и отсутствию учёта сил плавучести при компьютерном моделировании течения сверхкритической

воды. Как видно, значения  $\Delta V_x$  являются отрицательными вблизи оси трубы, и положительными у её стенки. Это, как очевидно, связано с тем, что при учёте сил плавучести ввиду свободного движения жидкости из ядра потока к стенке, скорость снижается в центральной зоне потока и возрастает вблизи стенки трубы.



**Рис. 2.** Закономерности изменения разности  $\Delta V_x$  осевых скоростей, отвечающих наличию и отсутствию учета сил плавучести, при течении сверхкритической воды вдоль трубы на различном расстоянии от ее входного сечения при варьировании плотности подводимого теплового потока  $q$ : 1 –  $q = 239 \text{ кВт/м}^2$ ; 2 –  $q = 263 \text{ кВт/м}^2$ ; 3 –  $q = 287 \text{ кВт/м}^2$ ; 4 –  $q = 310 \text{ кВт/м}^2$

Обращает на себя внимание также тот факт, что по длине трубы изменение максимального по абсолютной величине значения  $\Delta V_x$

(наблюдаемого вблизи стенки трубы) носит экстремальный характер. А именно, величина  $\Delta V_x$  возрастает вниз по течению, достигает наибольшего значения и дальше убывает (рис. 2). Такой характер поведения величины  $\Delta V_x$  отвечает описанному эффекту локализации зон с М-образным профилем скорости в центральной по длине зоне трубы.

**Выводы.** На основе выполненных исследований установлено следующее:

- влияние сил плавучести наиболее существенно проявляется на центральном по длине участке трубы;
- наибольшие отклонения значений скорости, отвечающих наличию и отсутствию учёта сил плавучести, наблюдаются вблизи стенки трубы в области мягкого локального максимума М-образного профиля скорости.

### Литература

1. 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.
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 24<sup>th</sup> 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. Моделирование течения и теплообмена в гладких трубах при сверхкритических давлениях. *Промышленная теплотехника*. 2016. 38. №3. С. 10-17.
4. 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.
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. Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Алешко С.А., Стрижеус С.Н., Войтенко А.Ю., Хмиль Д.П. и др. Характеристики теплообмена в вертикальных трубах при сверхкритических давлениях. Сб. Тр. «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2017. С. 130-133.
7. Zvorykin A., Fialko N., Sherenkovskyi J., Aleshko S., Meranova N. and other. 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.*
8. 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. *Промышленная теплотехника*. 2018. 40. №1. С.12-20.

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. 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. 12-1 .
11. 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.
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., Piro I., Stryzheus S. CFD Analysis of Supercritical-Water Flow and Heat Transfer in Vertical Bare Tube 26th International Conference on Nuclear Engineering, (ICONE-26), 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.