

УДК 536.242

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА НА СТЕНКЕ КАНАЛА И ДАВЛЕНИЯ ВОДЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В ГЛАДКИХ ТРУБАХ ПРИ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ

Фиалко Н.М.^{1,3}, член-корреспондент НАН Украины, **Пиоро И.Л.²**, докт. техн. наук,
Шеренковский Ю.В.¹, канд. техн. наук, **Майсон Н.В.¹**, **Меранова Н.О.¹**, канд. техн. наук,
Шараевский И.Г.³, докт. техн. наук

¹*Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03057, Украина*

²*Faculty of Energy Systems and Nuclear Science University of Ontario Institute of Technology 2000 Simcoe Str. N., Oshawa ON L1K 7K4 Canada*

³*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, Киев, 03028, Украина*

На основі CFD-моделювання одержано дані щодо особливостей течії та теплообміну надкритичної води в гладких трубах при варіюванні величин густини теплового потоку, що підводиться до стінки труби, та тиску води на вході. Представлено результати аналізу впливу цих величин на основні теплогідрравлічні параметри надкритичної води.

На основе CFD-моделирования получены данные, касающиеся особенностей течения и теплообмена сверхкритической воды в гладких трубах при варьировании величин плотности подводимого к стенке трубы теплового потока и давления на входе в трубу. Представлены результаты анализа влияния этих величин на основные теплогидравлические параметры сверхкритической воды.

Data relating to flow and heat transfer features of the supercritical water in bare tubes at varying of values of heat flux density supplied to the tube wall and inlet pressure are obtained based on CFD-simulation. The results of the analysis of the effect of these values on the basic heat-hydraulic parameters of supercritical water are presented.

Библ. 15, табл. 1, рис. 7.

Ключевые слова: сверхкритическая вода, течение, теплообмен, CFD-моделирование.

G – массовая скорость, кг/(м²с);

P – давление на входе в трубу, МПа;

q – плотность теплового потока на стенке трубы, Вт/м²;

r – радиальная координата, м;

T – температура, °С;

U_z – осевая компонента скорости, м/с;

z – осевая координата, м;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К);

ρ – плотность, кг/м³.

Нижние индексы:

b – среднемассовый (bulk fluid);

dht – ухудшенный теплообмен (deteriorated heat transfer);

pc – псевдокритический (pseudocritical);

w – стенка (wall).

Сокращения:

CFD – Computational Fluid Dynamics;

GIF – Generation IV International Forum;

RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes;

SCWR – Supercritical Water Reactor;

SST – Shear Stress Transport;

АЭС – атомная электростанция;

СКД – сверхкритическое давление.

Введение

Одной из шести концепций развития атомной энергетики, сформулированных в рамках

программы «Международный форум «Поколение VI» (GIF), является концепция инновационного реактора SCWR, охлаждаемого водой при сверхкритических давлениях (СКД) [1-3].

Научное сопровождение создания ядерных энергетических установок с SCWR связано с проведением большого комплекса работ, среди которых важное значение имеют теплогидравлические исследования [4-7]. В последний период при проведении таких исследований повышается роль CFD-моделирования, которое позволяет прогнозировать картины локальных характеристик течения и теплообмена [8-14].

Данная работа посвящена исследованию на основе CFD-моделирования эффектов влияния на теплогидравлические характеристики в вертикальных гладких трубах при СКД таких параметров, как удельная плотность теплового потока, подводимого к стенке трубы, и давление воды на входе в трубу.

Постановка задачи и методика исследований

Основные исходные данные и особенности методики математического моделирования приводятся в [13]. Значения варьируемых в ходе исследования величин даны в табл. 1. Температура воды на входе трубу для всех рассмотренных вариантов оставалась постоянной и принималась равной 350 °С. Величины критических тепловых потоков q_{dht} , при которых наступает режим ухудшенного теплообмена, согласно выполненным оценкам из [15], для всех исследуемых вариантов превышают рассматриваемые в данной работе уровни q (см. табл. 1). Вычислительные эксперименты базировались на RANS моделировании турбулентных течений с использованием k- ω SST модели турбулентного переноса.

Табл. 1. Значения основных варьируемых параметров для различных вариантов математического моделирования и соответствующие значения критического теплового потока q_{dht}

№ вар.	G , кг/м ² с	q , кВт/м ²	P , МПа	q_{dht} , кВт/м ²
1	1002	681	23,9	687
2	1200	681	23,9	835
3	1400	681	23,9	984
4	1002	581	23,9	687
5	1002	481	23,9	687
6	1002	581	27,0	687
7	1002	581	30,0	687

Результаты исследований и их анализ

Рисунки 1-7 иллюстрируют характерные данные выполненных численных исследований. Рассмотрим вначале результаты математического моделирования, касающиеся влияния плотности теплового потока q на закономерности течения и теплообмена. При проведении вычислительных экспериментов тепловой поток, подводимый к стенке, изменялся от 481 кВт/м² до 681 кВт/м² (варианты 5, 4, 1 табл. 1). То есть значение q повышалось примерно на 40 %.

Что касается изменений характеристик течения сверхкритической воды при варьировании величины q , то здесь необходимо отметить, что эти изменения существенно отличаются от таковых при варьировании массовой скорости G . Как видно из рис. 1, влияние q на значение скорости

U_z на оси трубы является однозначным. А именно, при уменьшении q скорость U_z снижается. При этом данное снижение на начальном обогреваемом участке трубы оказывается весьма незначительным и существенно увеличивается вниз по потоку. Влияние же величины G на скорость U_z является неоднозначным [14]. Повышение массовой скорости приводит к увеличению значений U_z вблизи входа в трубу и к их понижению – на ее выходном участке.

Влияние значений подводимого к стенке теплового потока q и массовой скорости сверхкритической воды G на характеристики ее течения отличается также и в количественном отношении. Данное влияние оказывается более существенным для теплового потока q . Так, при варьировании в исследуемом диапазоне значений q величина изменения скорости U_z на оси трубы достигает

3,0 м/с, а при варьировании G – лишь 0,7 м/с.

При уменьшении теплового потока q заметно повышаются значения коэффициента теплоотдачи (рис. 2). Однако, это повышение существен-

но меньше по величине, чем соответствующее повышение, отвечающее увеличению массовой скорости сверхкритической воды.

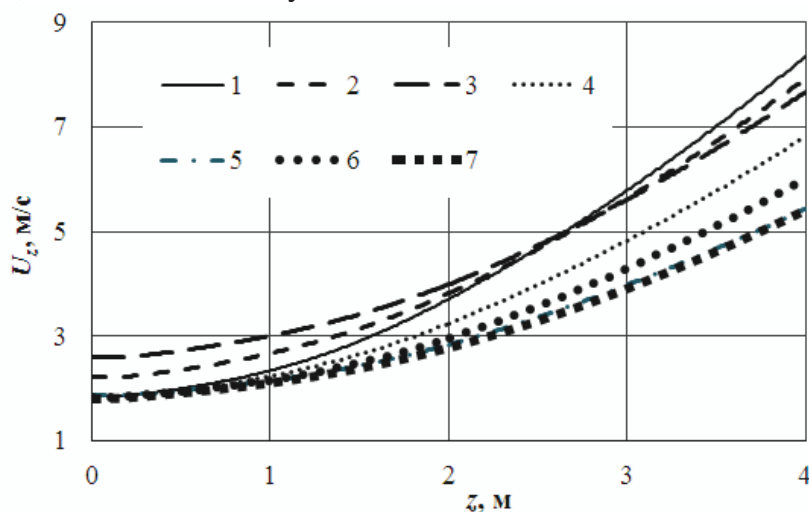


Рис. 1. Распределение осевой компоненты скорости вдоль оси трубы для различных вариантов математического моделирования: 1-7 – варианты 1-7, (табл. 1).

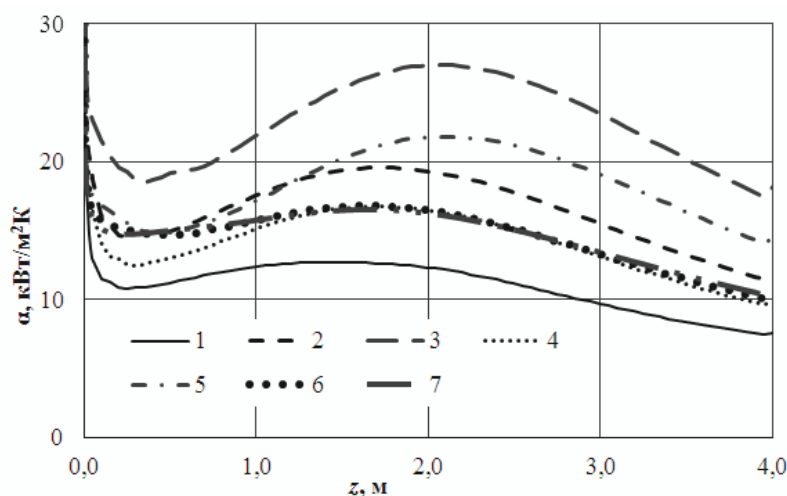


Рис. 2. Распределение коэффициента теплоотдачи вдоль обогреваемого участка трубы для различных величин подводимого к стенке трубы теплового потока: 1-7 – варианты 1-7 (табл. 1).

Как видно из рис. 3, значения температуры T_b практически совпадают для 2 и 4 вариантов, а также для 5 и 3. То есть в рассматриваемых условиях увеличение массовой скорости сверхкритической воды и уменьшение подводимого к стенке теплового потока одинаково сказываются на уровнях среднемассовой температуры жидкости. Что же ка-

сается температуры T_w , то ее значения для указанных вариантов отличаются весьма незначительно (рис. 4). Таким образом, согласно полученным данным влияние уменьшения теплового потока q и повышения G на тепловое состояние жидкости и стенки трубы в рассматриваемом диапазоне их изменения оказывается весьма близким по величине.

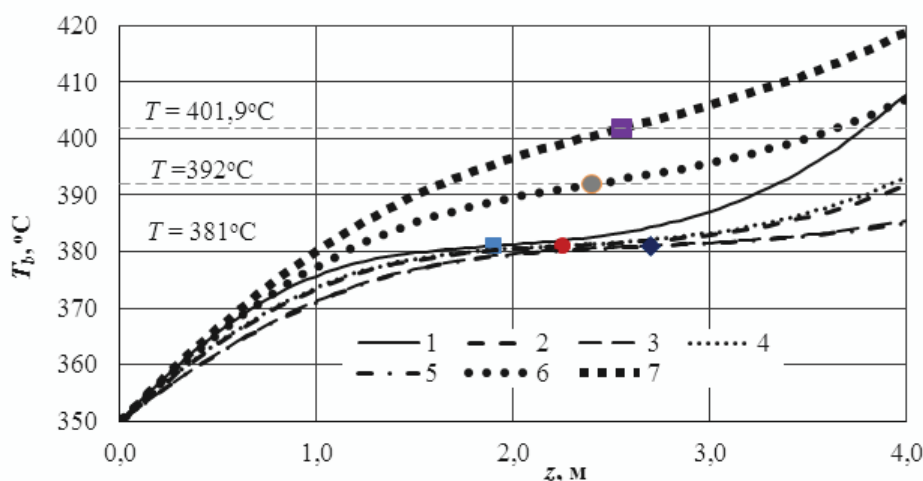


Рис. 3. Распределение среднemasовой температуры жидкости вдоль обогреваемого участка для различных вариантов математического моделирования: 1-7 – варианты табл. 1.

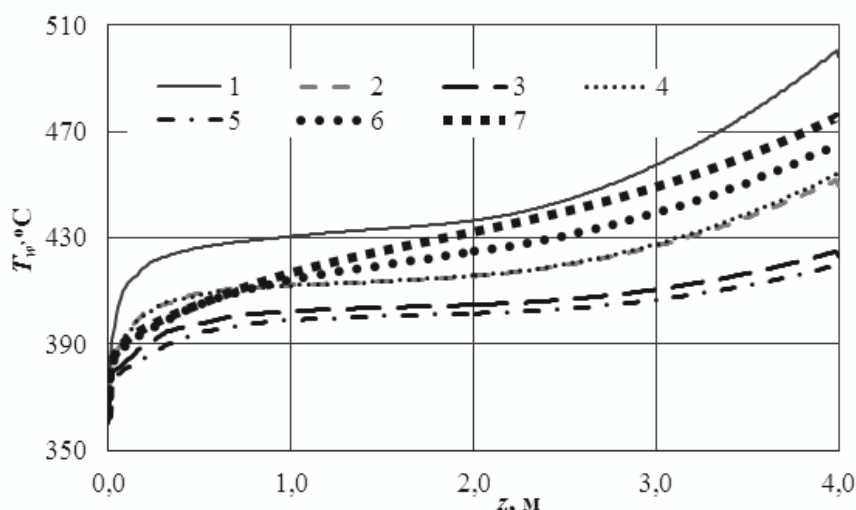


Рис. 4. Распределение температуры стенки по оси трубы для различных вариантов расчетов: 1-7 – варианты табл. 1.

Близкими для сопоставляемых вариантов являются также и конфигурации фронта псевдокритического перехода (рис. 5). Так, для варианта 2 ($q = 681 \text{ кВт/м}^2$, $G = 1200 \text{ кг/м}^2\text{с}$) и варианта 4 ($q = 581 \text{ кВт/м}^2$, $G = 1002 \text{ кг/м}^2\text{с}$) данный фронт достигает оси трубы при $z = 2,51 \text{ м}$ и $z = 2,46 \text{ м}$ соответственно, а для варианта 3 ($q = 681 \text{ кВт/м}^2$, $G = 1400 \text{ кг/м}^2\text{с}$) и варианта 5 ($q = 481 \text{ кВт/м}^2$, $G = 1002 \text{ кг/м}^2\text{с}$) при $z = 2,89 \text{ м}$ и $z = 2,93 \text{ м}$.

Перейдем далее к анализу теплогидравлических характеристик воды СКД при варьировании давления среды. При проведении исследований

давление жидкости на входе в трубу составляло 23,9 МПа, 27,0 МПа и 30,0 МПа (варианты 2, 4, 5 табл. 1). Псевдокритическая температура, соответствующая данным давлениям, равна 381°C , 392°C и $401,9^\circ\text{C}$.

Как видно из рис. 1 и рис. 6, с ростом давления скорость потока понижается. При этом отличие скоростей, отвечающих разным значениям P_{in} , увеличивается по длине трубы. Такой характер влияния давления, в большой мере обусловлен тем, что с его повышением связано увеличение плотности сверхкритической воды (рис. 7).

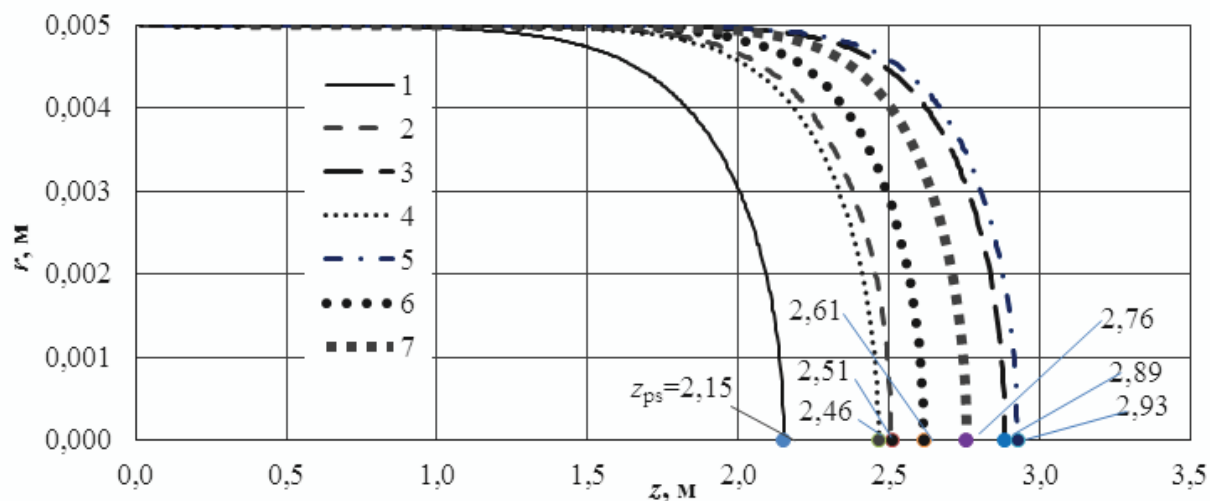


Рис. 5. Конфигурация фронта псевдокритического фазового перехода воды в трубе для различных вариантов расчетов: 1-7 – варианты табл. 1.

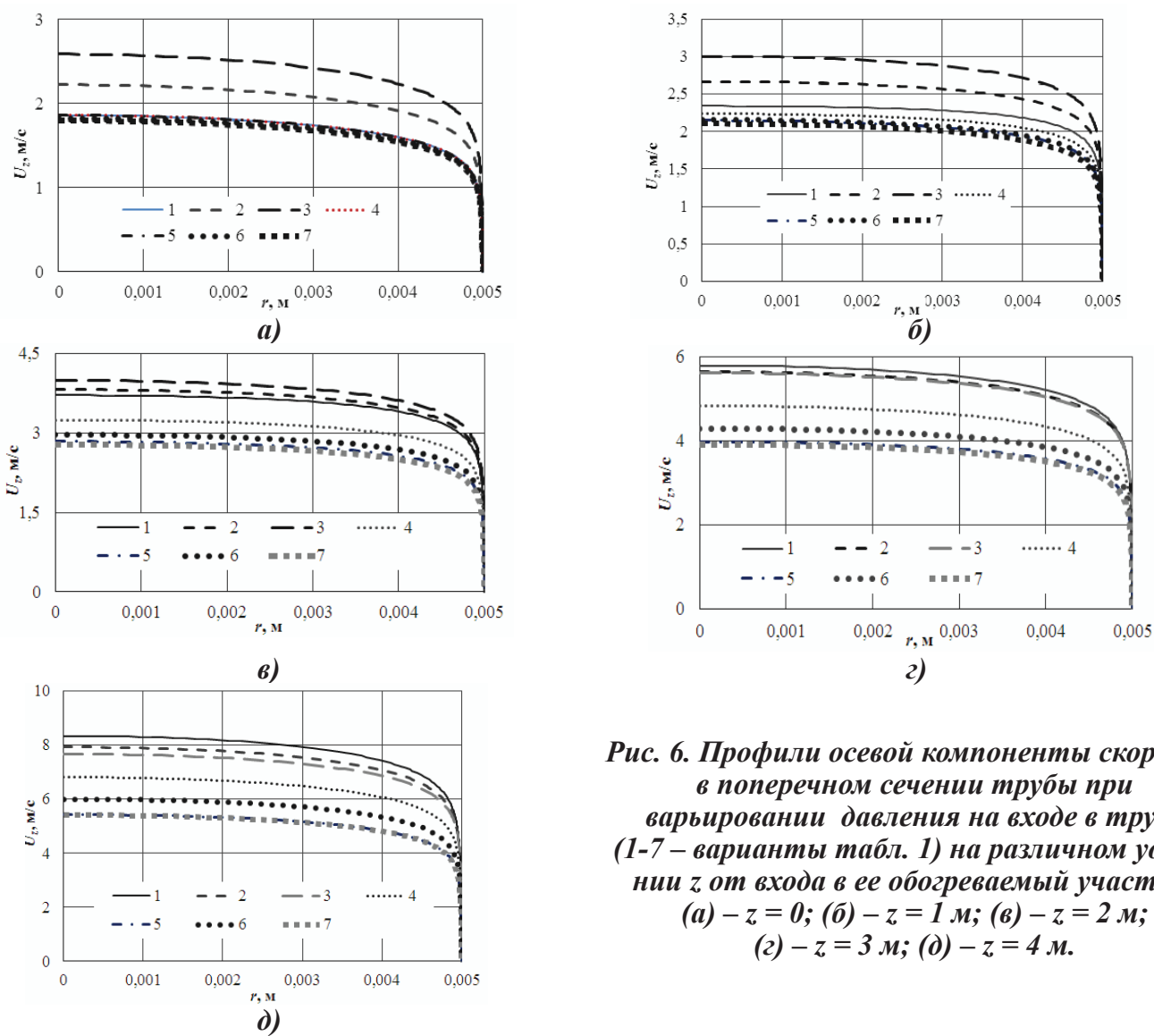


Рис. 6. Профили осевой компоненты скорости в поперечном сечении трубы при варьировании давления на входе в трубу (1-7 – варианты табл. 1) на различном удалении z от входа в ее обогреваемый участок: (а) – $z = 0$; (б) – $z = 1$ м; (в) – $z = 2$ м; (г) – $z = 3$ м; (д) – $z = 4$ м.

Как показали результаты выполненных исследований, изменение в рассматриваемом диапазоне давления P_{in} не существенно сказывается на величине коэффициента теплоотдачи на значительной части обогреваемой длины трубы. Некоторое занижение коэффициентов теплоотдачи имеет место лишь при $P = 23,9$ МПа вблизи входа в обогреваемый участок трубы (рис. 2).

При повышении давления наблюдается изменение характера поведения температур T_w и T_b по длине трубы (рис. 3, 4). А именно, при $P = 23,9$ МПа на центральном по длине участке трубы указанные температуры остаются практически постоянными. Наличие такого участка, как очевидно, связано с особенностями температурной зависимости удельной теплоемкости воды при данном давлении (высокое значение максимума c_p , отвечающего псевдокритической температуре).

При больших давлениях ($P = 27,0$ МПа и $P = 30,0$ МПа) указанные участки стабилизации температур T_w и T_b отсутствуют, что в значительной степени обуславливается существенным снижением максимумов на кривых $c_p = f(T)$.

С ростом давления температуры T_b повышаются на всей обогреваемой длине трубы, а температуры T_w – на значительной ее части, исключая начальный участок.

При всех рассмотренных значениях давления температуры T_w и T_b изменяются по длине трубы таким образом, что их разность весьма несущественно зависит от давления. Заметные отличия величин ΔT , отвечающих разным давлениям, наблюдаются только вблизи входа в обогреваемый участок трубы.

Что касается картины движения в жидкости фронта псевдокритического перехода для разных давлений P_{in} , то согласно полученным данным при его повышении скорость перемещения фронта от стенки трубы к ее оси снижается (рис. 5). Соответственно, чем выше давление, тем позже данный фронт достигает оси трубы. Как видно из рис. 5, при $P = 23,9$ МПа, 27,0 МПа и 30,0 МПа линия фронта псевдокритического перехода пересекает ось трубы на расстоянии от ее входа, равном 2,46 м, 2,61 м и 2,76 м.

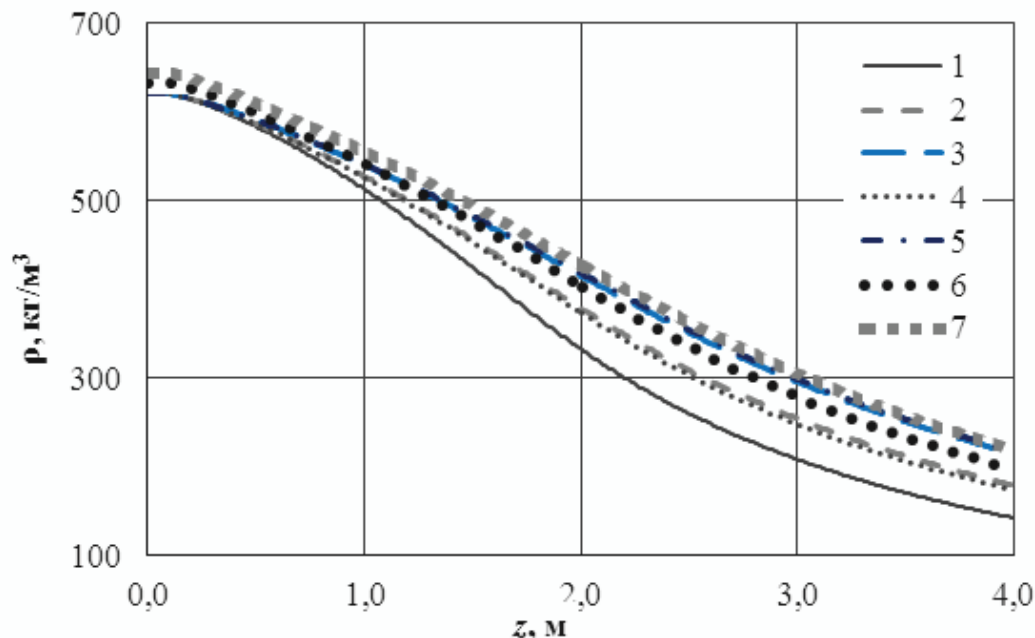


Рис. 7. Изменение плотности воды вдоль оси трубы при различных значениях входного давления: 1-7 – варианты табл. 1.

Выводы

1. Исследованы особенности влияния на характеристики течения и теплообмена сверхкритической воды величины подводимого к стенке

теплового потока q в диапазоне его изменения от 481 кВт/м² до 681 кВт/м² для $P_{in} = 23,9$ МПа и $G = 1002$ кг/м²с. Проведено сопоставление тепло-гидравлических параметров жидкости при вари-

ровании величин q и G . В частности показано, что уменьшение теплового потока q приводит к существенно меньшему повышению α , чем соответствующее увеличение массовой скорости G . При этом указанные изменения q и G обуславливают весьма близкие по величине изменения теплового состояния сверхкритической воды и температуры стенки трубы.

2. Установлены закономерности влияния давления P_{in} на входе в трубу на теплогидравлические параметры сверхкритической воды в диапазоне его изменения от 23,9 МПа до 30,0 МПа при $q = 581$ кВт/м², $G = 1002$ кг/м²с. Показано, что повышение давления несущественно сказывается на величине коэффициента теплоотдачи за исключением небольшого участка вблизи входа в трубу. Увеличение давления приводит к повышению среднемассовой температуры жидкости T_b на всей обогреваемой длине трубы, а температуры стенки T_w – на большей ее части, исключая начальный участок. При этом разность температур T_w и T_b весьма несущественно зависит от давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Pioro I.* Nuclear Power as a Basis for Future Electricity Production in the World // Current Research in Nuclear Reactor Technology in Brazil and Worldwide /Book eds. by A. Mescuita and H. Rezende. – Rijeka, Croatia: INTECH, 2012. – P. 211-250.
2. *Pioro I.* Generation IV Nuclear Reactors as a Basis for Future Electricity Production in the World / I. Pioro, P. Kirillov // Materials and Processes for Energy: Communicating Current Research and Technology Developments. Energy book series. Vol. 1 /Book eds. by A. Mendez-Vilas. – Spain, Formatex Research Center, 2013. – P.813-830.
3. *Kellyt J.E.* Generation IV International Forum: A decade of progress through international cooperation / J.E. Kellyt // Progress in Nuclear Energy. – 2014. – Vol. 77. – P. 240-246.
4. *Bazargan M.* Forced convection heat transfer to turbulent flow of SCW in a round horizontal tube. - PhD Thesis. - University of British Columbia, Canada. – 2001.
5. *Duffey R.B.* Supercritical water-cooled nuclear reactors (SCWRs): current and future concepts–steam-cycle options / R. B. Duffey, I. Pioro, X. Zhou, U. Zirn, S. Kuran, H. Khartabil, M. Naidin // Proc. ICONE-16, Orlando, FL, USA, May 11–15, 2008, Paper 48869. – P. 469-477.
6. *Pioro I.* Heat Transfer and Hydraulic Resistance at Supercritical Pressures in Power Engineering Applications / I. Pioro, R. Duffey, // ASME Press, New York, NY, USA. – 2007. – 334 p.
7. *Kirillov P.* Experimental Study on Heat Transfer to Supercritical Water Flowing in 1- and 4-m-Long Vertical Tubes / P. Kirillov, R. Pometko, A. Smirnov, V. Grabeznaia // Proc. GLOBAL'05, Tsukuba, Japan. – 2005. – P. 518.
8. *Agranat V.* CFD-Modelling of Supercritical Water Heat Transfer in a Vertical Bare Tube Upward Flow/ V. Agranat, M. Malin, I. Pioro, R. Abdullah, V.A. Perminov // Proceedings of ICONE-23, May 17-21, Chiba, Japan. – 2015. – Paper 1163. – 11 p.
9. *Farah A.* Assessment of Fluent CFD Code as an Analysis Tool for Supercritical-Water Heat-Transfer Applications / A. Farah, G. Harvel, I. Pioro // Proceedings of the 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics (NURETH-15), Pisa, Italy, May 12-15, 2013. – Paper 118. – 13 p.
10. *Yang J.* Numerical investigation of heat transfer in upward flows of supercritical water in circular tubes and tight fuel rod bundles / J. Yang, Y. Oka, Y. Ishiwatari, J. Liu, J. Yoo // Nuclear Engineering and Design. – 2007. – Vol. 237. – P. 420-430.
11. *Zahlan H.* Assessment of Supercritical Heat Transfer Prediction Methods / H. Zahlan, D.C. Groeneveld, S. Tavoularis, S. Mokry, I. Pioro // Proceedings of the 5-th International Symposium on SCWR (ISSCWR-5), Vancouver, BC, Canada, March 13–16, 2011. – Paper P008. – 20 p.
12. *Wen Q.L.* Numerical simulation of heat transfer deterioration phenomenon in supercritical water through vertical tube/ Q.L. Wen, H.Y. Gu // Annals of Nuclear Energy. – 2010. – Vol. 37. – P. 1272-1280.
13. *Фиалко Н.М.* Моделирование течения и теплообмена в гладких трубах при сверхкритических давлениях / Н.М. Фиалко, И.Л. Пиоро, Н.В. Майсон, Н.О. Меранова // Промышленная тепло-техника. – 2016, №3. – С.12-21.
14. *Фиалко Н.М.* Влияние массовой скорости

потока на характеристики течения и теплообмена в гладких трубах при сверхкритических параметрах / Н.М. Фиалко, И.Л. Пиоро, Н.В. Майсон, Н.О. Меранова, И.Г. Шараевский // Промышленная теплотехника. – 2016, №4. – С. 5-12.

15. *Mokry S.* Development of Supercritical Water Heat-Transfer Correlation for Vertical Bare Tubes / S. Mokry, I.L. Pioro, A. Farah, K. King, S. Gupta, W. Peiman, P. Kirillov // Nuclear Engineering and Design. – 2011, Vol. 241. – P. 1126–1136.

EFFECTS OF HEAT FLUX IN THE CHANNEL WALL AND WATER PRESSURE ON THE CHARACTERISTICS OF FLOW AND HEAT TRANSFER IN BARE TUBES AT SUPERCRITICAL PARAMETERS

Fialko N.M.^{1,3}, Pioro I.L.², Sherenkovsky Yu.V.¹, Maison N.V.¹, Meranova N.O.¹, Sharaevsky I.G.³

¹ Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Zhelyabova 2a, Kyiv, 03057, Ukraine

² Faculty of Energy Systems and Nuclear Science University of Ontario Institute of Technology 2000 Simcoe Str. N., Oshawa ON L1K 7K4 Canada

³ Institute of safety problem of NPP of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lysogorskaja, 12, Kyiv, 03680, Ukraine

The features of the effect of value of supplied to the wall heat flux q in the range of change from 481 kW/ m² to 681 kW/m² for $P_{in} = 23.9$ MPa and $G = 1002$ kg/m²s on the flow and heat transfer characteristics of supercritical water are researched. A comparison of heat and hydraulic parameters flow by varying of q and G values are made. The regularities influence of inlet pressure P_{in} to the heat-hydraulic parameters of supercritical water in the range of its change from 23.9 MPa to 30.0 MPa at $q = 581$ kW / m², $G = 1002$ kg / m²s are established.

It is shown that the pressure increase is insignificant effect on the heat transfer coefficient value except for a small zone in the near the inlet tube. Increasing the pressure leads to rising the bulk fluid temperature T_b throughout the heated length of the tube, and to the wall temperature T_w – in most part of tube, excluding the initial zone. The difference temperatures T_w and T_b insignificantly depends from the pressure. References 15, tables 1, figures 7.

Key words: supercritical water, flow, heat transfer, CFD-simulation.

1. *Pioro I.* Nuclear Power as a Basis for Future Electricity Production in the World // Current Research in Nuclear Reactor Technology in Brazil and Worldwide/Book eds. by A.Mescuita and H.Rezende. – Rijeka, Croatia: INTECH, 2012. – P. 211-250.

2. *Pioro I.* Generation IV Nuclear Reactors as a Basis for Future Electricity Production in the World / I. Pioro, P. Kirillov // Materials and Processes for Energy: Communicating Current Research and Technology Developments (Energy book series, Vol. 1)/Book eds. by A. Mendez-Vilas. – Spain, Formatex Research Center, 2013. – P.813-830.

3. *Kellyt J.E.* Generation IV International Forum: A decade of progress through international cooperation/ J.E. Kellyt // Progress in Nuclear Energy. – 2014. – Vol 77. – P. 240-246.

4. *Bazargan M.* Forced convection heat transfer to turbulent flow of SCW in a round horizontal tube. – PhD Thesis. – University of British Columbia, Canada. – 2001.

5. *Duffey R.B.* Supercritical water-cooled nuclear reactors (SCWRs): current and future concepts–steam-cycle options / R. B. Duffey, I. Pioro, X. Zhou, U. Zirn, S. Kuran, H. Khartabil, M. Naidin //Proc. ICONE-16, Orlando, FL, USA, May 11–15, 2008, Paper 48869. – P. 469-477.

6. *Pioro I.* Heat Transfer and Hydraulic Resistance at Supercritical Pressures in Power Engineering Applications / I. Pioro, R. Duffey // ASME Press, New York, NY, USA. – 2007. – 334 p.

7. *Kirillov P.* Experimental Study on Heat Transfer to Supercritical Water Flowing in 1- and 4-m-Long Vertical Tubes / P. Kirillov, R. Pometko, A. Smirnov, V. Grabezhnaia // Proc. GLOBAL'05,

Tsukuba, Japan. – 2005. – P. 518.

8. *Agranat V.* CFD-Modelling of Supercritical Water Heat Transfer in a Vertical Bare Tube Upward Flow/ V. Agranat, M. Malin, I. Pioro, R. Abdullah, V.A. Perminov // Proceedings of ICONE-23, May 17-21, Chiba, Japan. – 2015. – Paper 1163. – 11 p.

9. *Farah A.* Assessment of Fluent CFD Code as an Analysis Tool for Supercritical-Water Heat-Transfer Applications / A. Farah, G. Harvel, I. Pioro // Proceedings of the 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics (NURETH-15), Pisa, Italy, May 12-15, 2013. – Paper 118. – 13 p.

10. *Yang J.* Numerical investigation of heat transfer in upward flows of supercritical water in circular tubes and tight fuel rod bundles / J. Yang, Y. Oka, Y. Ishiwatari, J. Liu, J. Yoo // Nuclear Engineering and Design. – 2007. – Vol. 237. – P. 420-430.

11. *Zahlan H.* Assessment of Supercritical Heat Transfer Prediction Methods / H. Zahlan, D.C. Groeneveld, S. Tavoularis, S. Mokry, I. Pioro // Proceedings of the 5-th International Symposium on SCWR (ISSCWR-5), Vancouver, BC, Canada, March 13–16, 2011. – Paper P008. – 0 p.

12. *Wen Q.L.* Numerical simulation of heat transfer deterioration phenomenon in supercritical water through vertical tube/ Q.L. Wen, H.Y. Gu // Annals of Nuclear Energy. – 2010. – Vol. 37. – P. 1272-1280.

13. *Fialko N.M.* Modeling of flow and heat transfer in the bare tubes at supercritical pressures / N.M. Fialko, I.L. Pioro, N.V. Mayson, N.O. Meranova //Promyshlennaja teplotekhnika. – 2016, №3. – P. 12-21. (Rus)

14. *Fialko N.M.* Effect of mass flux on the flow characteristics and heat transfer in bare pipes at supercritical parameters / N.M. Fialko, I.L. Pioro, N.V. Mayson, N.O. Meranova, I.G. Sharaevsky // Promyshlennaja teplotekhnika – 2016, №4. – P. (Rus)

15. *Mokry S.* Development of Supercritical Water Heat-Transfer Correlation for Vertical Bare Tubes / S. Mokry, I.L. Pioro, A. Farah, K. King, S. Gupta, W. Peiman, P. Kirillov // Nuclear Engineering and Design. – 2011, Vol. 241. – pp. 1126–1136.

Получено 12.09.2016

Received 12.09.2016