

Е.А. Кондратьева, канд. техн. наук, Ю.Ю. Ковецкая, А.В. Кравчук,  
А.И. Скицко, канд. техн. наук, Т.В. Сорокина, канд. техн. наук  
Институт технической теплофизики НАН Украины

## ТЕПЛООБМЕН ПРИ ТЕЧЕНИИ ВОДЫ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В КАНАЛЕ С ОБОГРЕВАЕМЫМИ СТЕРЖНЯМИ В НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ С ИЗМЕНЕНИЕМ МОЩНОСТИ

*Выполнено численное моделирование теплообмена при течении воды сверхкритического давления в семистержневой тепловыделяющей сборке с центральным необогреваемым стержнем в режиме с изменением тепловой мощности. Проанализированы условия возникновения режимов ухудшенного теплообмена. Режим ухудшенного теплообмена возникает локально в центральных ячейках тепловыделяющей сборки между обогреваемыми стержнями после того, как температура теплоносителя достигает критического значения. В этих ячейках наблюдается резкое возрастание температуры стенки тепловыделяющих элементов и ее сильная азимутальная неравномерность.*

**Ключевые слова:** ядерный реактор, теплообмен, тепловыделяющая сборка, сверхкритическое давление теплоносителя.

**Введение.** В последние годы активно обсуждается вопрос перехода на сверхкритические параметры теплоносителя в атомной энергетике [1-3]. Основная задача использования легководных реакторов со сверхкритическим давлением SCWR (Supercritical Water Reactor) состоит в том, чтобы повысить экономичность существующих технологий с реакторами PWR (Pressurized Water Reactor). Эта концепция реакторов рассматривается специалистами России, Японии, США, Франции, Канады, Китая и других стран в рамках международных программ по разработке реакторов четвертого поколения. Строительство АЭС с реакторами SCWR позволит существенно повысить КПД установок, снизить металлоемкость оборудования по сравнению с существующими АЭС с ВВЭР или PWR. Рассматриваются концепции реакторов корпусного и канального типа, с тепловым и быстрым спектром нейтронов. Ядерные энергоблоки с реактором SCWR характеризуются следующими особенностями:

- низким расходом теплоносителя и высоким его подогревом в активной зоне, что позволяет снизить мощность, потребляемую циркуляционными насосами;
- высокой энтальпией теплоносителя, что обеспечивает высокий КПД установки;
- однофазностью теплоносителя, следовательно, отсутствием режимов с кризисом теплообмена;
- реализацией прямого цикла, что приводит к компактности реакторной системы;
- возможностью использования технологий и оборудования энергоблоков СКД на органическом топливе.

Учитывая существующую структуру ядерной энергетике Украины, основанную на использовании ядерных реакторов с водой под давлением и открытого ядерного топливного цикла (ЯТЦ), представляется целесообразным ее развитие после 2030 года с использованием реакторов SCWR. В работе [4] показано, что применение SCWR позволяет на 20% снизить накапливаемые до 2100 г объемы отработанного ядерного топлива (ОЯТ), сократить финансовые затраты на обращение с ОЯТ в долгосрочной перспективе и при этом сохранить существующую долю АЭС в производстве электроэнергии в условиях реализации открытого ЯТЦ.

Основная задача использования SCWR состоит в том, чтобы повысить экономичность легководных реакторов за счет повышения КПД энергоблоков до 44...48%, снижения металлоемкости оборудования.

Однако переход на сверхкритическое давление теплоносителя в энергетике связан с рядом теплофизических проблем, одной из которых является определение безопасной области тепловых нагрузок, исключающих возникновение режимов ухудшенной теплоотдачи. Такие режимы возникают в обогреваемых каналах при течении воды сверхкритического давления в области резкого изменения теплофизических свойств. Исследованию условий возникновения режимов ухудшенной теплоотдачи, которые сопровождаются резким локальным повышением температуры стенки канала, способным вызвать ее разрушение, уделяется большое внимание [5-11]. В мире проведено большое количество исследований гидродинамики и теплообмена при течении жидкости сверхкритического давления в обогреваемых трубах. Исследования показали наличие режимов с нормальной, улучшенной и ухудшенной теплоотдачей. В режимах с нормальной теплоотдачей наблюдается монотонное изменение температуры стенки по длине трубы, в режимах с ухудшенной теплоотдачей может наблюдаться резко выраженное локальное повышение температуры стенки. До сих пор нет единого мнения по определению граничного значения плотности теплового потока  $q_{гр}$ , превышение которого приводит к возникновению режимов с ухудшенной теплоотдачей, и зависимости  $q_{гр}$  от режимных и геометрических параметров.

Резкое изменение теплофизических свойств воды в области критических параметров свидетельствует о существенном изменении ее структуры. Пики теплоемкости на сверхкритических изобарах наблюдаются в области температур, где происходит интенсивный распад крупных молекулярных образований на более мелкие. В работе [12] методом молекулярной динамики проанализировано влияние температуры, давления, плотности воды на ее структурные и динамические свойства. Расчеты показали, что на образование структур и разрывы водородных связей в до- и сверхкритической воде в основном влияет изменение температуры, влияние плотности менее выражено. При сверхкритическом давлении с ростом температуры наблюдается полное исчезновение тетраэдрических структур и превращение единой сетки водородных связей в отдельные образования из 2-3 молекул, находящихся в окружении несвязанных частиц.

Результаты экспериментальных исследований теплообмена при течении воды сверхкритического давления в каналах с пучками обогреваемых стержней также свидетельствуют о возникновении режимов ухудшенного теплообмена [13,14]. На границу возникновения режимов ухудшенного теплообмена в пучках существенно влияют его геометрические характеристики и режимные параметры. Об этом свидетельствуют как экспериментальные данные, так и результаты расчетов гидродинамики и теплообмена при течении воды сверхкритического давления в пучках с треугольной и квадратной упаковками. Расчеты проводились как с использованием поканальной методики, так и трехмерного моделирования [15-17]. В локальной области, где возникает режим ухудшенного теплообмена, отмечается недопустимо высокая азимутальная неравномерность температуры оболочки тепловыделяющего элемента.

#### *Моделирование нестационарного процесса в тепловыделяющей сборке*

Проведено численное исследование теплообмена при течении воды сверхкритического давления в вертикальной семистержневой тепловыделяющей сборке. Геометрические и режимные параметры сборки соответствуют параметрам активной зоны реактора ВВЭР-СКД [2]. Рассматривается вертикальное положение сборки, ось  $z$  направлена вдоль оси канала. Пучок стержней диаметром 9 мм, обогреваемой длиной 4,05 м расположен в треугольной упаковке с соотношением шага к диаметру стержней  $s/d=1,4$  (рис.1). Центральный стержень и стенка канала не обогреваются, на стенках шести обогреваемых стержней задается плотность теплового потока. На вход подается вода с температурой, меньшей критической для данного давления.

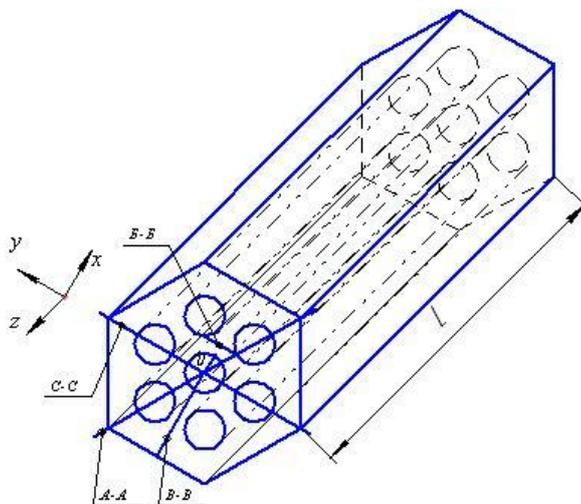


Рисунок 1 – Схема тепловыделяющей сборки.

Исследование гидродинамики и теплообмена в сборке проводилось на основе RNG  $k-\epsilon$  модели турбулентности, включающей систему уравнений сохранения массы, количества движения, энергии теплоносителя, а также уравнения для кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации энергии [18,19]. Уравнения состояния воды при до- и сверхкритических параметрах задавались согласно формуляции IFC-97 [20]. Граничные условия на входе в тепловыделяющую сборку: температура воды 290°C, скорость 0,5 м/с, давление 25МПа.

Наиболее интересными, с точки зрения безопасности и надежности работы оборудования, являются исследования нестационарных режимов, связанных с изменением тепловой нагрузки. Экспериментальных данных об условиях возникновения и развития режимов ухудшенного теплообмена при течении воды сверхкритического давления в каналах в нестационарных режимах крайне мало.

Рассматривается нестационарный режим при скачкообразном изменении плотности теплового потока на стенках тепловыделяющих элементов от 0 до 400 кВт/м<sup>2</sup> за 1 с. В разных ячейках пучка нестационарный процесс протекает по-разному. Наиболее теплонапряженной областью являются центральные ячейки пучка. На рис. 2,3 представлено изменение во времени и по длине канала профилей скорости и температуры теплоносителя в самой теплонапряженной области – в сечении Б-Б.

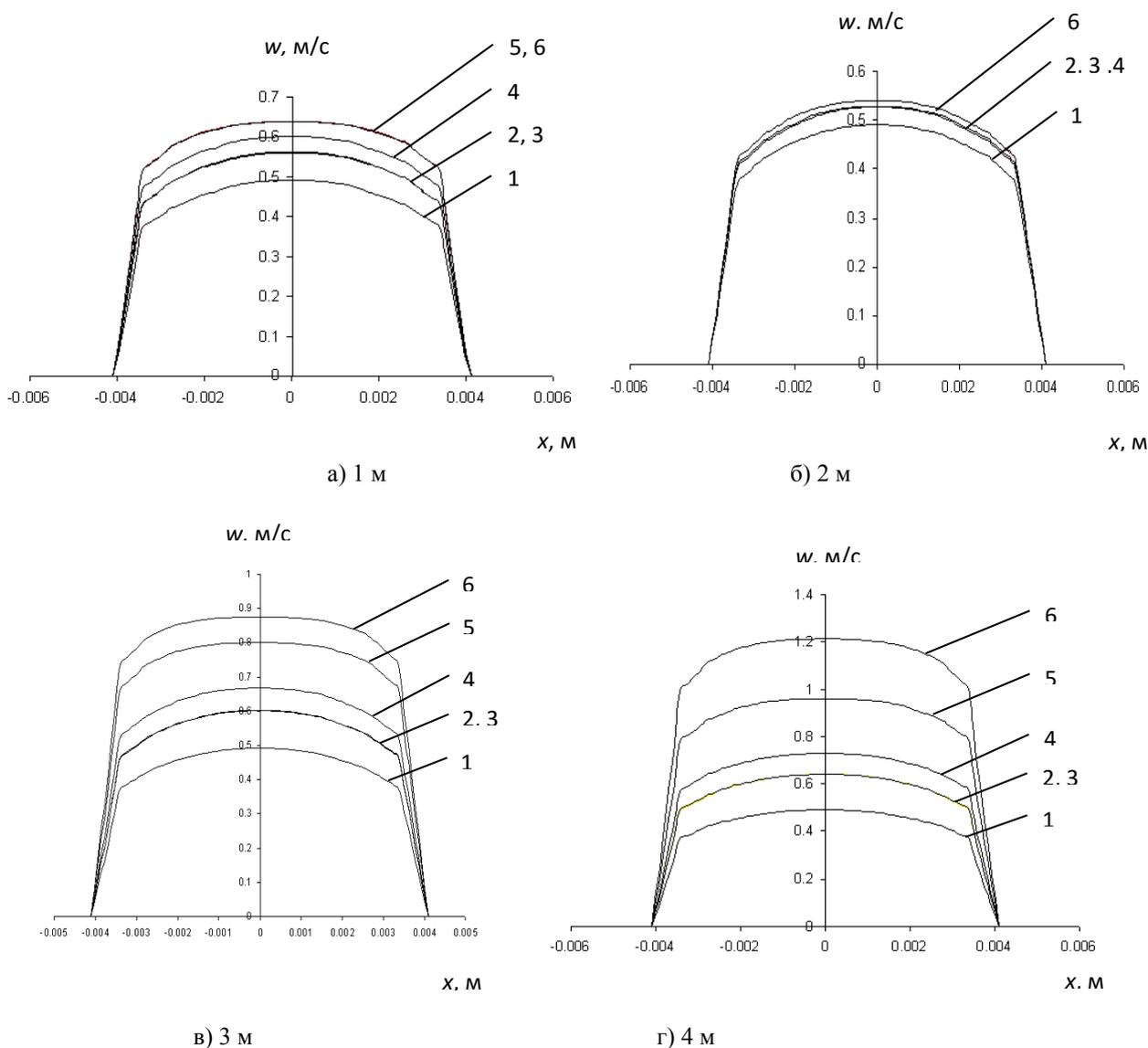


Рисунок 2 – Изменение во времени и по длине ТВС скорости в сечении Б-Б: 1 – 0 с, 2 – 0,2 с, 3 – 1 с, 4 – 3 с, 5 – 5 с, 6 – 6,8 с, 7 – стационар.

Кривые 1 на рис. 2,3 соответствуют исходному состоянию системы. Длительность переходного процесса составляет 7с. В сечении  $z=1$ м профиль скорости слабо изменяется во времени (рис. 2а), температура теплоносителя и стенки обогреваемого стержня увеличивается равномерно и через 3 с выходит на стационарное значение (рис.3а). В сечении  $z=2$ м скорость (рис.2б) и температура теплоносителя (рис.3б) увеличиваются, причем на 3 с наблюдается резкий скачок температуры. Далее профиль температуры выпрямляется, становится более равномерным. Сечение  $z=3$ м характеризуется резким возрастанием скорости на пятой секунде (рис.2в, кривая5), при этом профиль температуры становится равномерным, температура теплоносителя достигает критического значения 385°С (соответствует максимуму теплоемкости  $c_p$ ). Затем следует резкое увеличение температуры стенки тепловыделяющего элемента, что характеризует начало развития режима ухудшенного теплообмена. Наиболее существенные изменения скорости (рис.2г) и температуры (рис.3г) наблюдаются в выходном сечении тепловыделяющей сборки  $z=4$ м. Здесь наблюдается сильное ускорение потока после 3 с, в конце переходного процесса (7с) скорость достигает 1,2 м/с. Профиль температуры теплоносителя становится равномерным на пятой секунде, после чего температура стенки резко возрастает.

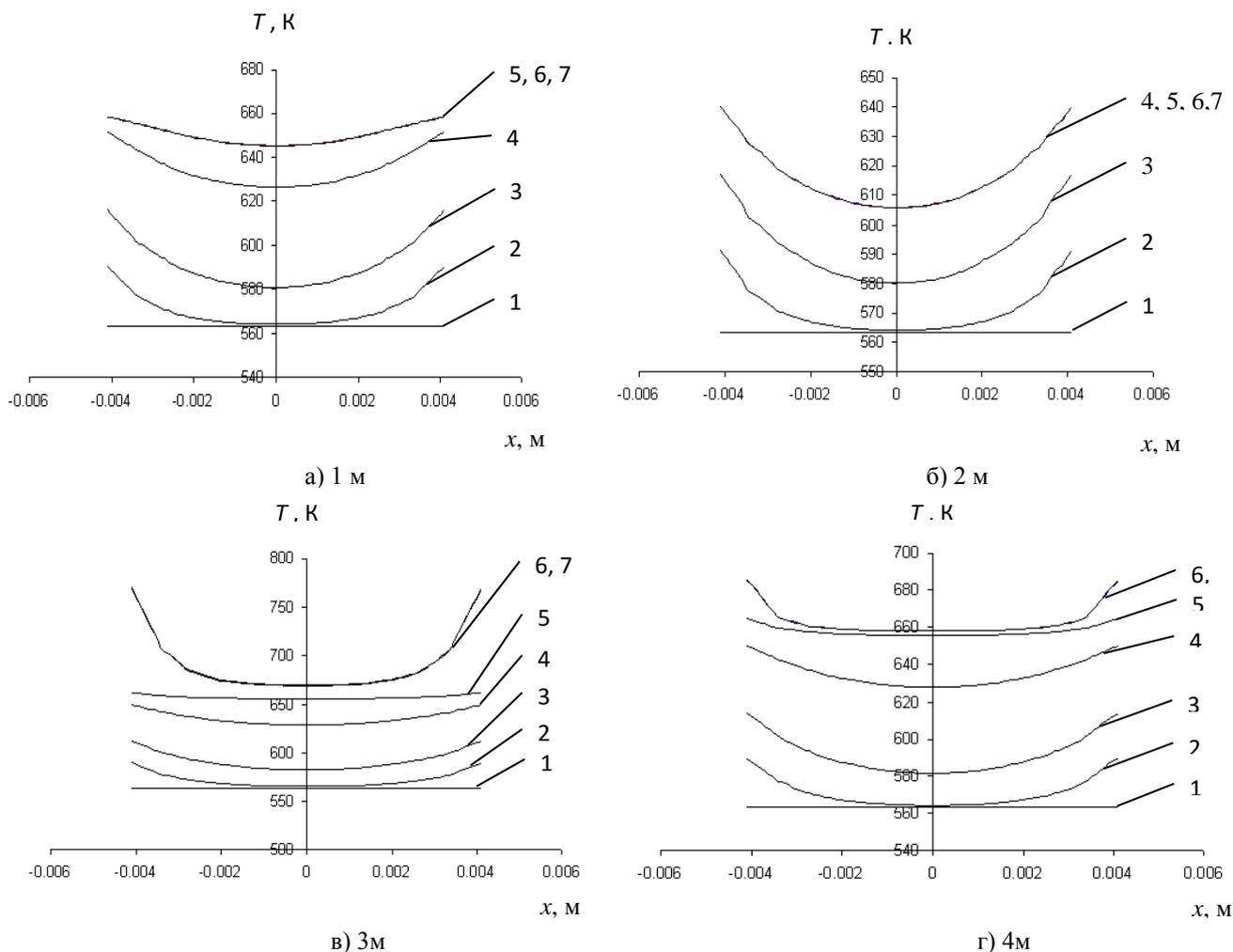


Рисунок 3 – Изменение во времени и по длине ТВС температуры в сечении Б-Б: 1 – 0 с, 2 – 0,2 с, 3 – 1 с, 4 – 3 с, 5 – 5 с, 6 – 6,8 с, 7 – стационар.

На рис. 4,5 представлено изменение во времени и по длине тепловыделяющего элемента в теплонапряженной точке температуры стенки и коэффициента теплоотдачи.

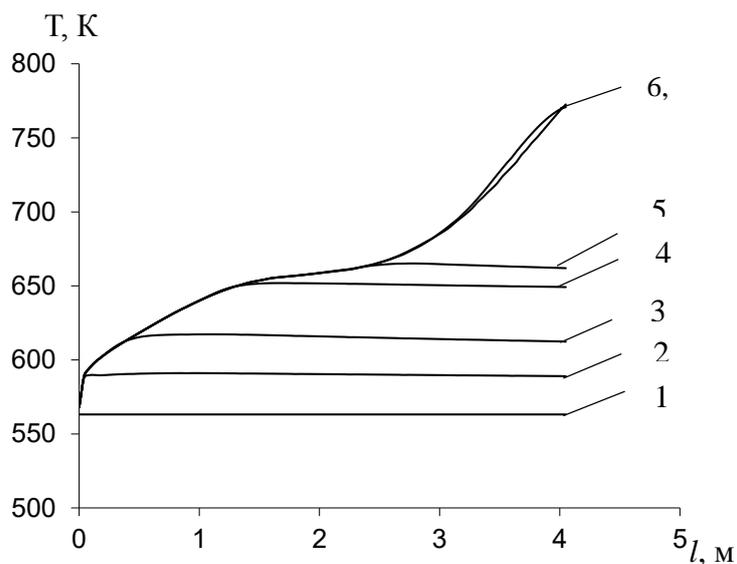


Рисунок 4 – Изменение температуры стенки во времени и по длине тепловыделяющего элемента в теплонапряженной точке: 1 – 0 с, 2 – 0,2 с, 3 – 1 с, 4 – 3 с, 5 – 5 с, 6 – 6,8 с, 7 – стационар.

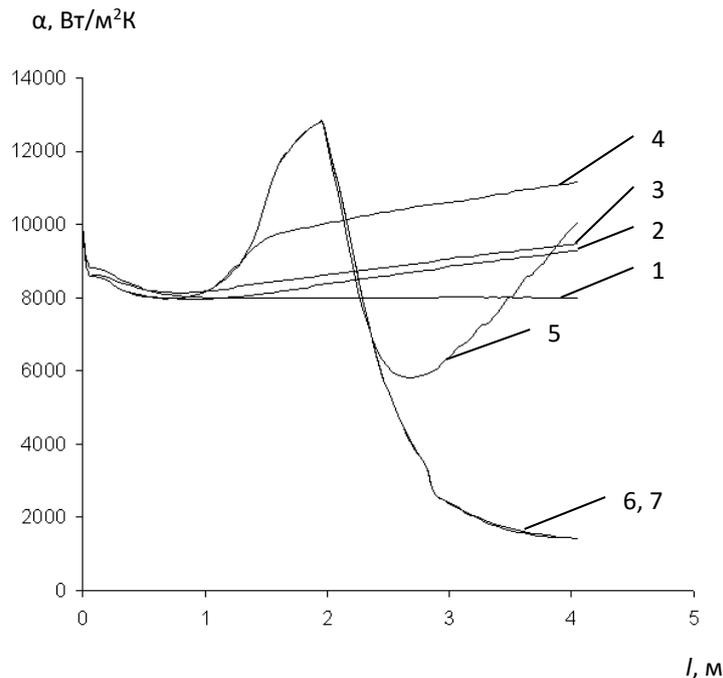


Рисунок 5 – Изменение коэффициента теплоотдачи во времени и по длине тепловыделяющего элемента в теплонапряженной точке: 1 – 0 с, 2 – 0,2 с, 3 – 1 с, 4 – 3 с, 5 – 5 с, 6 – 6,8 с, 7 – стационар.

До пятой секунды температура стенки изменяется равномерно, а коэффициент теплоотдачи увеличивается, режим ухудшенного теплообмена не наблюдается. Начиная с пятой секунды коэффициент теплоотдачи до сечения  $z=2$  м резко увеличивается, затем резко падает по длине и после прохождения минимума в сечении  $z=3$  м снова возрастает (рис.5, кривая 5). При этом температура стенки по длине в момент времени 5 с меняется равномерно. Режим ухудшенного теплообмена возникает после пятой секунды, начиная с сечения  $z=3$  м, о чем свидетельствует резкое уменьшение коэффициента теплоотдачи и резкое увеличение температуры стенки тепловыделяющего элемента. Выход на стационарный режим происходит через 6,8 с от начала нестационарного процесса.

В угловой ячейке пучка скорость теплоносителя изменяется слабо, максимальное значение скорости на выходе из сборки в конце процесса достигает 0,8 м/с. В угловой ячейке режим ухудшенного теплообмена не возникает, температура стенки по длине обогреваемых стержней и во времени изменяется равномерно. В конце переходного процесса на выходе из сборки температура стенки достигает 380°C, при этом средняя по сечению температура теплоносителя меньше критической (362°C).

### Выводы

При течении воды сверхкритического давления в семистержневой тепловыделяющей сборке с центральным необогреваемым стержнем наиболее теплонапряженными являются центральные ячейки пучка. Угловые ячейки пучка являются наименее теплонапряженными.

В нестационарном режиме с изменением тепловой нагрузки в центральных ячейках, на определенном расстоянии от входа, в сечениях, где температура теплоносителя достигает критического значения, возникает режим ухудшенного теплообмена. При этом наблюдается сильное ускорение потока и практически равномерный профиль температуры теплоносителя.

### Список использованной литературы

1. *Pioro I., Kirillov P.* Generation IY Nuclear Reactors as a Basis for Future Electricity Production in the World / <http://www.formatex.info/energymaterialbook/book/>. – 2013. – p.818 – 830
2. *Кириллов П.Л.* Водохлаждаемые реакторы на воде сверхкритических параметров // Теплоэнергетика. – 2008. – №5. – С.2–5.
3. *Cao L., Oka Y., Ishiwatari Y., Shang Z.* Core Design and Subchannel Analysis of a Superfast Reactor // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2008. – v.45, № 2. – P.138–148
4. *Власенко Н.И., Годун О.В., Кирьянчук В.Н.* Сравнительная оценка инновационных вариантов открытого ядерно-топливного цикла в Украине // Ядерна та радіаційна безпека. – 2014. – 3(63). – С.10–13

5. Грабежная В.А., Кириллов П.Л. Теплообмен при сверхкритических давлениях и границы ухудшения теплообмена// Теплоэнергетика.–2006. –№4. –С.46–51.
6. Yang X., Su G.H., Tian W, Wang J., Qiu S. Numerical study on flow and heat transfer characteristics in the rod bundle channels under super critical pressure condition// Annals of Nuclear Energy. – 2010. –37. –р.1723–1734
7. Gu Y.Y., Cheng X., Yang Y.H. CFD analysis of thermal – hydraulic behavior of supercritical water in sub –channels// Nucl. Eng. Des. . – 2010. –240(2). –р.364–374
8. Разумовский В.Г. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление гладких каналов при турбулентном течении воды сверхкритического давления// Диссертация канд. техн. наук. –1984. –222 с
9. Петухов Б.С., Курганов В.А., Анкудинов В.Б. Теплообмен и гидравлическое сопротивление в трубах при турбулентном течении жидкости околокритических параметров состояния//ТВТ. –1983. –т.21, №1. –С.92–100
10. Курганов В.А. Теплообмен в трубах при сверхкритических давлениях теплоносителя : некоторые итоги научного исследования // Труды РНКТ-4. – 2006. –т.1. –С.74–83
11. Алексеев Г.В., Силин В.А., Смирнов А.М., Субботин В.И. Исследование температурных режимов стенки трубы при теплосъеме водой сверхкритического давления// ТВТ.– 1976. –т.14, №4. –С.769–774
12. Ведь О.В., Петренко В.Е., Антипова М.Л., Альпер Г.А. Влияние параметров состояния на свойства сверхкритической воды. Компьютерное моделирование структуры и динамики сетки водородных связей// Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика. –2007. –т.2, №2. –С.55–68
13. Силин В.А., Семченков Ю.М., Алексеев П.Н., Митькин В.В. Исследование теплообмена и гидравлического сопротивления при течении воды сверхкритических параметров применительно к реакторным установкам// Атомная энергия. –2010. –т.108, №6. –С.340–347
14. Габараев Б.А., Смолин В.Н., Соловьев С.Л. Перспективное направление развития водоохлаждаемых реакторов АЭС в XXI в. – использование сверхкритических параметров//Теплоэнергетика.–1984. – №9. – С.33–40
15. Смирнов В.П., Папандин М.В., Ложинов А.Я., Ванюкова Г.В., Афонин С.Ю. Применение CFD – кода к расчету теплообмена в реакторе со сверхкритическими параметрами// Атомная энергия. –2011. –т.111, № 4.– С.196–201.
16. Yang X., Su G.H., Tian W, Wang J., Qiu S. Numerical study on flow and heat transfer characteristics in the rod bundle channels under super critical pressure condition// Annals of Nuclear Energy. – 2010. –37. –р.1723–1734
17. Авраменко А.А., Ковецкая М.М., Кондратьева Е.А., Тыринов А.И. Гидродинамика и теплообмен потока воды с сверхкритическими параметрами в вертикальной сборке тепловыделяющих элементов// Инженерно-физический журнал. –2013. –т.86, № 4. –С.760–767
18. Авраменко А.А. Ренормгрупповой анализ нестационарной турбулентности // Доповіді НАН України. – 2007. – № 12. – С.88 – 93.
19. Авраменко А.А., Басок Б.И., Кузнецов А.В. Групповые методы в теплофизике. Киев. Нукова думка. – 2003. – 483 с.
20. Александров А.А., Орлов К.А., Очков В.Ф. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики. Москва. Изд. дом МЭИ.- 2009

**Е.А.Kondratieva, Yu.Yu. Kovetskaya, A.V. Kravchuk, A. Skitsko, T. Sorokina  
Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine  
HEAT TRANSFER OF SUPERCRITICAL PRESSURE WATER IN THE CHANNEL WITH HEATED  
RODS IN UNSTEADY REGIME WITH CHANGE OF POWER**

*Numerical simulation of heat of supercritical pressure water flow in fuel assembly with seven fuel elements and a central unheated rod with changing thermal power was carried. The conditions of deteriorated heat transfer were analyzed. Regime of degraded heat transfer occurs locally in the central cells of the fuel assembly between heated fuel elements after reaching the critical temperature of coolant. In these cells sharp increase of temperature of walls of heat emitting elements and a strong azimuthally non-uniformity of the heat transfer coefficient were observed.*

**Keywords:** nuclear reactor, heat transfer, heat emitting assembly, supercritical pressure of coolant

**References**

1. Pioro I., Kirillov P. Generation IY Nuclear Reactors as a Basis for Future Electricity Production in the World / <http://www.formatex.info/energymaterialbook/book/>. – 2013. – P.818 – 830. (Eng.)
2. Kirillov P. L. Water-cooled reactors, supercritical water // Теплоэнергетика. –2008. –№5. – С.2–5. (Rus.)
3. Cao L., Oka Y., Ishiwatari Y., Shang Z. Core Design and Subchannel Analysis of a Superfast Reactor // Journal of Nuclear Science and Technology. –2008. – V.45, № 2. – P.138–148. (Eng.)
4. Vlasenko N.I., Godun O.V., Kiryanchuk V.N. Comparative evaluation of innovative options open for nuclear fuel cycle in Ukraine // Nuclear and Radiation Safety. – 2014. – V.3, №63. – С.10–13. (Rus.)

5. *Hrabezhnaya V.A., Kirillov P.L.* Heat transfer at supercritical pressures and limits of heat transfer deterioration // *Teploenergetika*. – 2006. – №4. – С.46–51. (Rus.)
6. *Yang X., Su G.H., Tian W, Wang J., Qiu S.* Numerical study on flow and heat transfer characteristics in the rod bundle channels under super critical pressure condition // *Annals of Nuclear Energy*. – 2010. – №37. – P.1723–1734. (Eng.)
7. *Gu Y.Y., Cheng X., Yang Y.H.* CFD analysis of thermal – hydraulic behavior of supercritical water in sub –channels // *Nucl. Eng. Des.* – 2010. – V.240, №2. – P.364–374. (Eng.)
8. *Razumovsky V.G.* Heat transfer and hydraulic resistance of smooth channel in turbulent water flow supercritical pressure / PhD dissertation . – KPI. Kiev. – 1984. – 222 P. (Rus.)
9. *Petukhov B.S., Kurganov V.A., Ankudinov V.B.* Heat transfer and hydraulic resistance in the pipes in turbulent fluid flow near-critical state parameters // *High Temperature*. – 1976. – V.14, №4. – P.769 – 774. (Rus.)
10. *Kurganov V.A.* Heat transfer in pipes at supercritical pressure coolant: some of the results of scientific research // *Works of the Russian National Heat Transfer Conference - 4*. – 2006. – V.1. – P.74-83. (Rus.)
11. *Alekseev G.V., Silin V.A., Smirnov A.M., Subbotin V.I.* Study of temperature modes of the pipe wall at the heat take off supercritical water // *High Temperature*. – 1976. – V.14, №4. – P. 796 – 774. (Rus.)
12. *Vedy O.V., Petrenko V.E., Antipova M.L., Alper G.A.* Effect of state parameters on the properties of supercritical water. Computer modeling of the structure and dynamics of the hydrogen bond network // *Supercritical Fluids: Theory and Practice*. – 2007. – V.2, №2. – P.55–68. (Rus.)
13. *Silin V.A., Semchenkov Yu.M., Alekseev P.N., Mit'kin V.V.* The study of heat transfer and flow resistance for the flow of supercritical water in relation to the reactor plants // *Atomic Energy*. – 2010. – V.108, №6. – P.340–347. (Rus.)
14. *Gabaraev B.A., Smolin V.N., Solovyov S.L.* Promising direction of development of water-cooled nuclear reactors in XXI c. // *Teploenergetika*. – 1984. – №9. – С.33–40
15. *Smirnov V.P., Papandin M.V., Loninov A.Ya., Vanyukova G.V., Afonin S.Yu.* Application of CFD - code to the calculation of heat transfer in the reactor with supercritical parameters // *Atomic Energy*. – 2011. – V.111, № 4. – P.196–201. (Rus.)
16. *Yang X., Su G.H., Tian W, Wang J., Qiu S.* Numerical study on flow and heat transfer characteristics in the rod bundle channels under super critical pressure condition // *Annals of Nuclear Energy*. – 2010. – №37. – P.1723–1734. (Eng.)
17. *Avramenko A.A., Kovetskaya M.M., Kondratieva E.A., Tyrinov A.I.* Hydrodynamics and heat flow with supercritical parameters in the vertical assembly of fuel // *Journal of Engineering Physics*. – 2013. – V.86, № 4. – P.760–767. (Rus.)
18. *Avramenko A.A.* Renormalization-group analysis of unsteady turbulence // *Reports of National Academy of Sciences of Ukraine*. – 2007. – № 12. – P.88 – 93. (Rus.)
19. *Avramenko A.A., Basok B.I., Kuznetsov A.V.* Group methods in thermal physics. Kiev.: Naukova Dumka. – 2003. – 483 p. (Rus.)
20. *Aleksandrov A.A., Orlov K.A., Ochkov V.F.* Thermophysical properties of working substances of power system. Moscow.: Izd.Dom MEI.- 2009. (Rus.)

УДК621.039.5:536.24

**О.О. Кондратьєва**, канд. техн. наук, **Ю.Ю. Ковецька**, **О.В. Кравчук**,  
**О.І. Скілько**, канд. техн. наук, **Т.В.Сорокіна**, канд. техн. наук  
Інститут технічної теплофізики НАН України

### **ТЕПЛООБМІН ПРИ ТЕЧІЇ ВОДИ НАДКРИТИЧНОГО ТИСКУ В КАНАЛІ ЗІ СТРИЖНЯМИ, ЩО ОБІГРІВАЮТЬСЯ, В НЕСТАЦІОНАРНОМУ РЕЖИМІ ЗІ ЗМІНОЮ ПОТУЖНОСТІ**

*Виконано числове моделювання теплообміну при течії води надкритичного тиску в семистрижневої тепловидільної збірки з центральним стрижнем, що не обігрівається, в режимі зі змінною теплової потужності. Проаналізовано умови виникнення режимів погіршеного теплообміну. Режим погіршеного теплообміну виникає локально в центральних комірках тепловидільної збірки між обігрівальними стрижнями після того, як температура теплоносія досягне критичного значення. В цих комірках спостерігається різке зростання температури стінки тепловиділяючих елементів та її сильна азимутальна нерівномірність.*

**Ключові слова:** ядерний реактор, теплообмін, тепловиділяюча збірка, надкритичний тиск теплоносія.

Надійшла 17.10.2016

Received 17.10.2016