

УДК 536.24.083

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.009

Применение компьютерных технологий на примере программного кода RELAP5 для расчетного воспроизведения экспериментов по изучению теплообмена в трубах с водой сверхкритического давления

Суджян Артавазд Манукович, Осипов Алексей Михайлович

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,

Россия, Москва, artavazd1994@gmail.com

Аннотация. Расчетные исследования теплогидравлических процессов в активной зоне ядерных реакторов с легководным теплоносителем сверхкритического давления имеют высокую значимость. При этом сложность определения свойств воды в области сверхкритических параметров приводят к необходимости дальнейшего развития теплогидравлических моделей и инструментов прогнозирования, для чего приходится обращаться к современным компьютерным и информационным технологиям. Такие исследования необходимы при обосновании безопасности концепций ядерных реакторов со сверхкритическими параметрами теплоносителя. В рамках обоснования безопасности водо-водяных реакторов под давлением широкое распространение получил расчетный код RELAP5. При проведении расчетов крайне важны соотношения, используемые в программном коде для описания процесса теплообмена между стенкой и жидкостью. Для оценки корректности данных по теплообмену в трубах и пучках с водой сверхкритического давления, используемых в коде RELAP5, было выполнено воспроизведение эксперимента по изучению теплообмена в вертикальной трубке. Проведена серия расчетов температур стенки и теплоносителя при давлениях 23 и 25 МПа и различных тепловых потоках в диапазоне 600-1100 кВт/м². Выполнено сравнение результатов эксперимента с результатами его расчетного воспроизведения. Результаты расчета и эксперимента сопоставлены с теоретическими представлениями о механизме теплоотдачи в воде сверхкритического давления.

Ключевые слова: ядерный реактор, компьютерные технологии, информационные технологии, легководный теплоноситель сверхкритического давления, теплообмен, RELAP5

Цитирование: Суджян А.М. Применение компьютерных технологий на примере программного кода RELAP5 для расчетного воспроизведения экспериментов по изучению теплообмена в трубах с водой сверхкритического давления / А.М. Суджян, А.М. Осипов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 3(27). – С. 95-103. – DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.009.

Введение. В современной ядерной энергетике предъявляются повышенные требования к безопасности и эффективности работы ядерных реакторов. На основании этого, в рамках международного форума Generation-IV [1] выбраны концепции ядерных реакторов, которые должны удовлетворять этим требованиям. Одной из шести таких концепций является реактор, охлаждаемый водой сверхкритического давления (СКД). Целью создания таких реакторов является повышенная эффективность (КПД примерно до 40 - 45%), снижение капитальных и эксплуатационных расходов, повышение эффективности использования топлива, повышение коэффициента теплоотдачи, возможность разработки быстрого реактора с водой сверхкритического давления с коэффициентом воспроизводства больше 1 [2]. При этом необходимо учитывать особенности свойств воды в окрестностях критической точки. Несмотря на то, что жидкости СКД рассматриваются как однофазные среды, в их свойствах выделяется так называемая «область псевдофазового перехода», по обе стороны от которой характер свойств существенно отличается [3]. Эта область отмечена на P-T диаграмме воды, показанной на рисунке 1 [4].

Ежегодно в рамках работ по проектированию реакторов СКД странами-участницами Generation-IV проводятся множество исследований. В силу особенностей работы в области сверхкритических давлений воды, возникают сложности с проведением экспериментальных работ, как технические, так и экономические. Исходя из этого, большинство исследований, посвященных данному типу реакторов носят именно расчетный характер. Чаще всего таким образом проводят три вида исследований: теплообмен в трубах и пучках, охлаждаемых

водой сверхкритического давления, авария с потерей легководного сверхкритического теплоносителя, а также неустойчивость расхода теплоносителя сверхкритических параметров в одиночном или параллельных обогреваемых каналах.

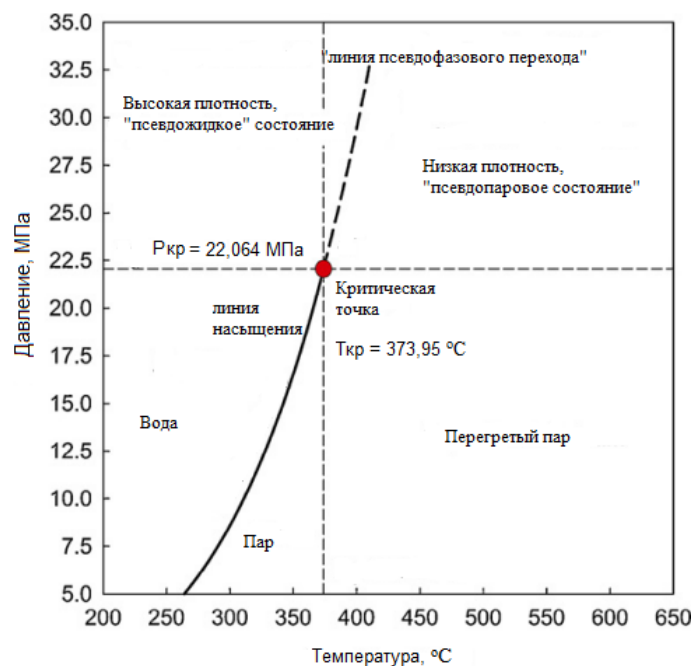


Рис. 1. P-T диаграмма воды

Изучение теплообмена в трубах и пучках с водой сверхкритического давления является одной из базовых научно-технических задач, решение которых необходимо при проектировании реакторов СКД [5]. В рассматриваемой области свойств легководного теплоносителя наблюдается весьма сложный характер различных режимов теплообмена. Во время первых исследований было обнаружено, что конвективный теплообмен может протекать как более интенсивно, так и менее интенсивно по сравнению с водой при докритических давлениях [6]. В результате этого был сделан вывод о том, что процессы, протекающие при сверхкритических параметрах, аналогичны кипению и кризису теплообмена в двухфазных потоках при докритическом давлении. Тогда был введен новый термин «псевдокипение». Принято выделять три режима теплоотдачи: нормальный, ухудшенный и улучшенный. Ухудшение теплоотдачи объясняется переходом от «псевдопузырькового» к «псевдопленочному» кипению [7].

Целью данной работы являлось воспроизведение эксперимента по исследованию теплообмена восходящего потока сверхкритической воды в вертикальной трубке, выполненного на экспериментальной петле SCTM (Supercritical Water Thermalhydraulic Mechanism) в Институте Ядерной Энергии Китая (NPIC) [8].

Среди существующих расчетных кодов, одним из наиболее широко используемых для теплогидравлического анализа реакторов с легководным теплоносителем является RELAP5 [9]. Его активно используют в том числе для расчетов теплогидравлических процессов в системах, охлаждаемых водой сверхкритического давления. Поэтому RELAP5 использован в качестве инструмента для данного исследования.

1. Описание установки и эксперимента. Как уже было отмечено выше, для воспроизведения был выбран эксперимент по изучению теплообмена, выполненный на петле SCTM.

Петля SCTM. Петля SCTM представляет собой контур, сконструированный для исследования теплообмена в вертикальной трубке в условиях сверхкритических параметров водяного, принудительно циркулирующего теплоносителя [8]. Работа петли организована

следующим образом. Дистиллированная и деионизированная вода из резервуара пропусклась через фильтр с помощью плунжерного насоса высокого давления. Насос позволял работать при давлении до 32 МПа и массовом расходе до 0,14 кг/с. Для регулирования давления в контуре использовался компенсационный резервуар. Регулирующие клапаны и расходомеры, установленные в контуре, позволяли контролировать массовый расход воды через рабочий участок. Перед входом в рабочий участок воду предварительно подогревали до требуемой температуры. Подогрев осуществлялся непосредственно от источника переменного тока мощностью 240 кВт. Блок питания постоянного тока мощностью 600 кВт обеспечивал контроль теплового потока в рабочем участке. Вода из рабочего участка с температурой на выходе до 550 °С смешивалась с водой комнатной температуры из байпасной линии в камере смешения. Затем она протекала через два теплообменника. Теплообменники охлаждали воду из камеры смешения до комнатной температуры с помощью циркулирующей охлаждающей воды. После прохождения через обратный клапан давление воды снижалось до атмосферного, после чего она снова поступала в исходный резервуар. Контроль контура и измерения проводились с использованием системы контроля и сбора данных. Схема SCTM показана на рисунке 2.

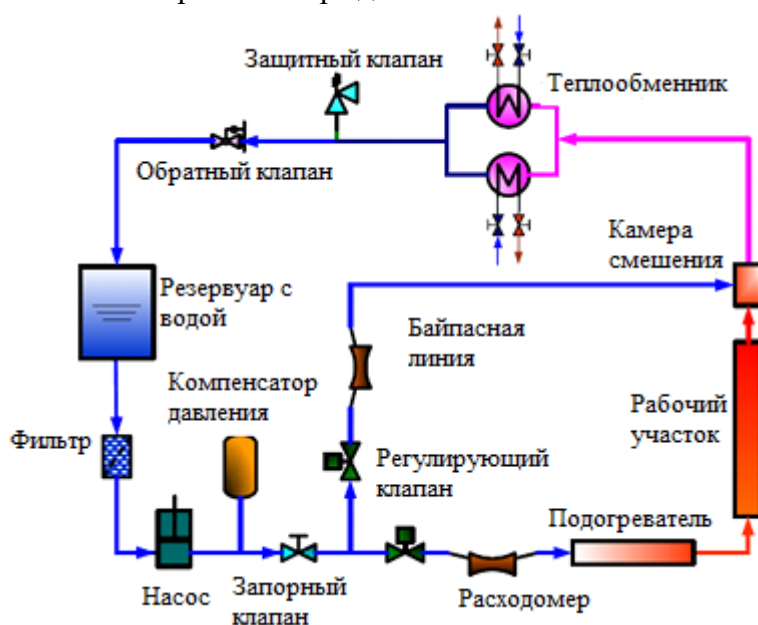


Рис. 2. Схема петли SCTM

В качестве материала для испытательной секции SCTM был выбран сплав инконель-625. Внутренний диаметр трубки испытательного участка составляет 6 мм, толщина ее стенки – 2 мм, а длина активного нагрева – 300 см. Трубка нагревается с помощью трех медных проводов, подключенных от источника постоянного тока мощностью 600 кВт. Для измерения температуры теплоносителя на входе и выходе из рабочего участка использовались две термопары (типа N). Вдоль экспериментальной трубы были выделены 11 секций для измерения внешней температуры стенки, к каждой секции были прикреплены по 2 термопары (типа N). Также была выделена зона измерения перепада давления, в которой был расположен датчик для измерения полного перепада давления.

Условия эксперимента. Эксперименты проводились при различных значениях давлений и тепловых потоков в системе, а также при заданных значениях массового расхода. Выбранные значения давлений составили 23, 24 и 25 МПа, массовая скорость варьировалась в промежутке 600 кг/м²с до 1200 кг/м²с, тепловой поток – от 600 кВт/м² до 1100 кВт/м², а температура теплоносителя от 300 °С до 500 °С. Параметры эксперимента вынесены в таблицу 1.

Таблица 1. Параметры эксперимента

Параметр	Значение
Давление (МПа)	23, 24, 25
Массовая скорость (кг/м ² с)	600-1200
Тепловой поток (кВт/м ²)	600-1100
Температура теплоносителя на входе/выходе из рабочего участка (°С)	300-500

2. Программная реализация. Воспроизведение эксперимента было выполнено с помощью программного кода RELAP5. В целях упрощения, при решении данной задачи, рассмотрение петли SCTM было ограничено рабочим участком.

Модель рабочего участка. Схема рабочего участка, реализованная в RELAP5, представлена на рисунке 3. Входная секция представлена время-зависимым объемом (ВЗО) 001 и время-зависимым соединением (ВЗС) 002. Рабочий участок представлен трубой 003. Непосредственно в данной трубе происходит нагрев теплоносителя, описанный в тепловой структуре. Выходной участок представлен одиночным соединением 004 и ВЗО 005.

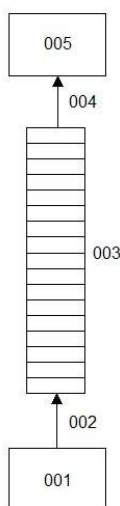


Рис. 3. Схема рабочего участка в RELAP5

подавляющее большинство расчетных работ в RELAP5 выполнены для легкой воды при докритических давлениях, что соответствует условиям нормальной эксплуатации существующих энергетических установок на легкой воде. Несмотря на то, что данный программный код содержит свойства легкой воды в сверхкритической области, опыт показал, что код недостаточно надежно выполняет расчеты в окрестности критической точки, в отличие от расчетов в докритической области. Проблема может быть частично решена благодаря использованию опций 21 (интерполирует производные плотности и температуры, которые хранятся в паровых таблицах) и 26 (использует билинейные подгонки термодинамических свойств и частных производных плотности и температуры по давлению и внутренней энергии в области сверхкритического давления). Использование данных опций позволило решить рассматриваемую задачу. Однако, для более сложных задач (например, расчета аварий с потерей теплоносителя СКД), в которых давление в системе резко меняется и преодолевает «область псевдофазового перехода», могут потребоваться более серьезные вмешательства в расчетные алгоритмы кода RELAP5.

3. Особенности расчета теплоотдачи. Для сравнения результатов эксперимента и результатов, полученных в расчете, использованы значения внешних температур стенки трубки по длине рабочего участка и энтальпии теплоносителя. Логика, используемая в RELAP5, подразумевает, что при давлении, превышающем критическое (22.12 МПа [10]) для

расчета теплоотдачи используется соотношение Диттуса-Болтера [11], так же, как и для однофазной жидкости или пара.

$$Nu = 0,023Re_{жс}^{0,8}Pr_{жс}^{0,4} \quad (1)$$

где Nu , Re , Pr – безразмерные критерии Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля, соответственно, а индекс «жс» характеризует физические свойства среды при среднемассовой температуре жидкости.

Корреляция Диттуса-Болтера позволяет предсказывать экспериментальные значения коэффициента теплоотдачи за пределами «области псевдофазового перехода» [12]. Однако, ее применение для расчета в пределах «области псевдофазового перехода» приводит к значительным отклонениям от экспериментальных данных. Данная корреляция не может быть применена для определения коэффициента теплоотдачи в области с ухудшенным режимом теплоотдачи.

Соотношение Диттуса-Болтера позволяет получить коэффициент теплоотдачи, практически совпадающий с экспериментальным, при тепловом потоке, равно нулю [7]. Известно, что использование данной корреляции приводит к относительно малым коэффициентам теплоотдачи при высоких значениях числа Прандтля. Таким образом, коэффициент теплоотдачи вблизи псевдокритической температуры, при которой число Прандтля становится большим, может быть занижен по сравнению с экспериментальным.

С увеличением теплового потока отклонения значений коэффициента теплоотдачи, полученных с помощью корреляции Диттуса-Болтера становятся более значительными [13]. Это объясняется сильной зависимостью теплофизических свойств, особенно удельной теплоемкости, от температуры. Свойства жидкости вблизи стенки отклоняются от тех, что вдали от стенки, и это отклонение увеличивается с ростом теплового потока.

Проведенные расчеты. Для выполнения расчетов, воспроизводящих эксперименты на петле SCTM, были использованы параметры, соответствующие описанным в пунктах 2.1 и 2.2. Однако, из-за неполноты исходных данных об эксперименте (в основном, данных о гидравлических сопротивлениях), возникла необходимость подбора исходных данных для RELAP5 с целью получения в процессе расчета необходимых номинальных значений, соответствующих условиям эксперимента. Причем, воспроизводились только эксперименты по выявлению режима ухудшенной теплоотдачи, которые проводились при двух фиксированных значениях давлений и различных тепловых потоках. Основные параметры, использованные для расчета представлены в таблице 2.

Таким образом, начальные и граничные значения были заданы в исходном файле. Стоит обратить внимание на различие значений температур теплоносителя на входе в рабочий участок в эксперименте и в расчете (300 °С и 200 °С соответственно).

Таблица 2. Основные параметры для расчета

Давление (МПа)	Тепловой поток (кВт/м ²)	Массовая скорость (кг/м ² с)	Температура теплоносителя на входе/выходе из рабочего участка (°С)
23	568; 602; 642	668; 657; 655	200/500
25	929; 989; 1045; 1102	1263; 1261; 1205; 1186	200/500

При анализе результатов эксперимента было обнаружено, что, несмотря на указанное в эксперименте значение входной температуры теплоносителя около 300 °С, реальные значения ближе к 200 °С, что было принято во внимание при моделировании. Расчет был

проведен до установления стационарных значений, для чего было достаточно 100 расчетных секунд, что соответствует реальному времени 5 секунд при расчете на процессоре Intel Core i7-351U с минимальным и максимальным шагом по времени 10^{-7} с и 10^{-2} с соответственно.

Результаты. По окончании расчетов были построены графики сравнения результатов эксперимента и его расчетного воспроизведения. На рисунке 4 представлены результаты при давлении 23 МПа, а на рисунке 5 – для 25 МПа.

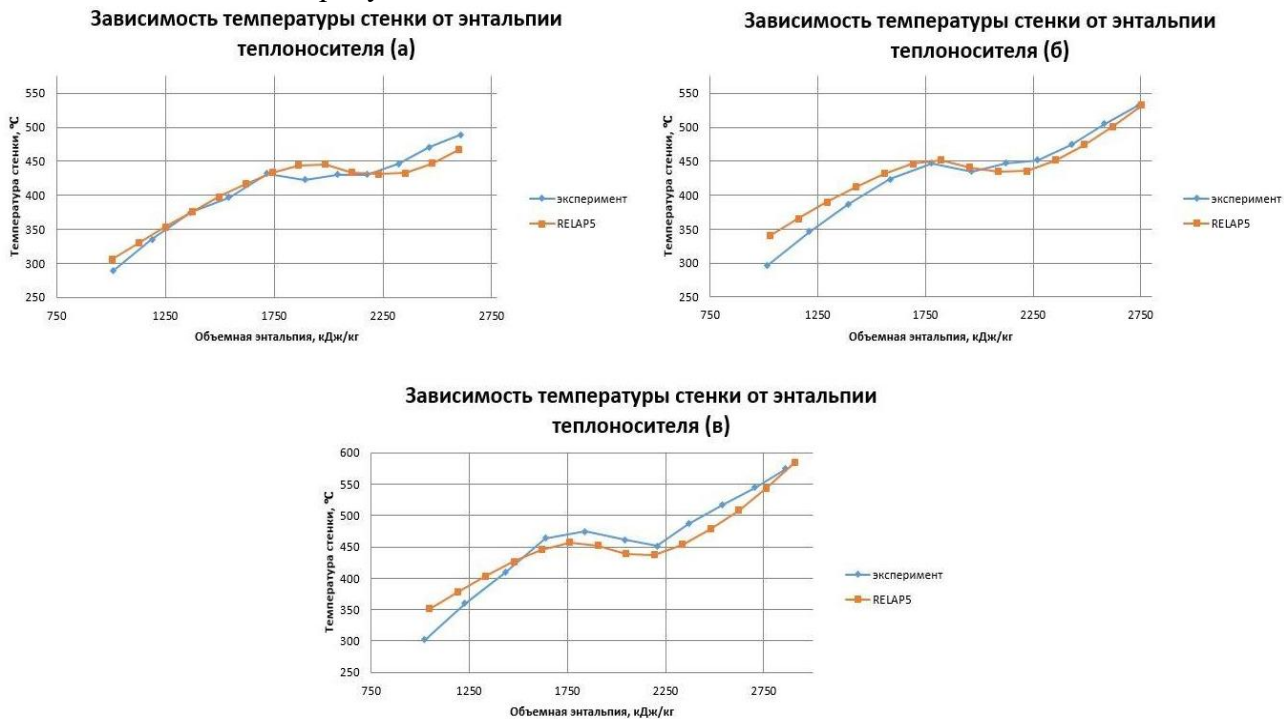


Рис. 4. Сравнение результатов эксперимента и его расчетного воспроизведения при давлении 23 МПа для тепловых потоков: а) 568 кВт/м²; б) 602 кВт/м²; в) 642 кВт/м²

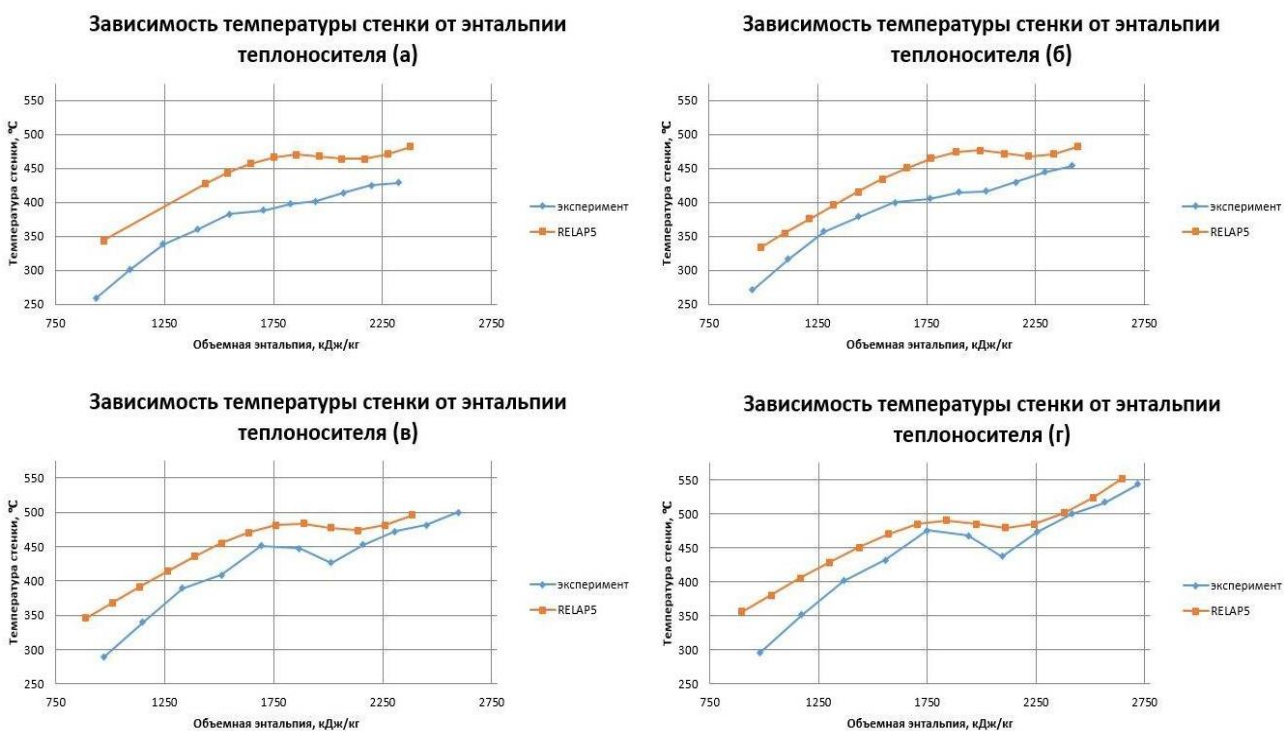


Рис. 5. Сравнение результатов эксперимента и его расчетного воспроизведения при давлении 25 МПа для тепловых потоков: а) 929 кВт/м²; б) 989 кВт/м²; в) 1045 кВт/м²; г) 1102 кВт/м²

По результатам эксперимента четко виден возникающий пик температуры стенки, после которого наблюдается «впадина». Это происходит в «области псевдофазового перехода». По результатам расчета можно видеть такую же картину, но с некоторым смещением относительно результатов эксперимента. Из рисунков видно, что при давлении 23 МПа расхождения результатов эксперимента и расчета меньше, нежели при давлении 25 МПа. В таблице 3 представлены результаты оценки максимального относительного отклонения результатов расчета от результатов эксперимента для каждого из случаев

Таблица 3. Оценка погрешности расчета

Давление (МПа)	Тепловой поток (кВт/м ²)	Энтальпия (кДж/кг)	Температура стенки экспериментальная (°С)	Температура стенки расчетная (°С)	Относительное отклонение (%)
23	568	2480	475	449	6
23	602	2183	449	435	3
23	642	2435	499	470	6
25	929	1750	392	467	19
25	989	1831	410	471	15
25	1045	2013	427	477	12
25	1102	2101	437	481	10

Это в очередной раз подтверждает соображения относительно использования корреляции Диттуса-Болтера, описанные в пункте 3.2. Значения тепловых потоков в экспериментах при давлении 25 МПа были практически в два раза выше, чем при давлении 23 МПа. Это оказало серьезное влияние на точность полученных результатов, несмотря на то, что качественно зависимости, полученные по значениям из эксперимента и его воспроизведения, схожи. Из этого следует, что, помимо необходимости модернизации таблиц свойств воды и водяного пара в RELAP5, необходимо также рассмотреть возможность применения в данном программном коде различных корреляций, разработанных специально для сверхкритической области свойств воды.

Заключение. В работе было выполнено воспроизведение эксперимента по изучению теплообмена в трубке с водой сверхкритического давления. Для этого был выбран эксперимент на петле SCTM. По исходным данным из статьи [8] была выполнена серия расчетов по программе RELAP5, воспроизводящей исследования, выполненные в эксперименте. Были построены зависимости внешней температуры стенки от энтальпии теплоносителя в соответствующем объеме. Качественно результат показывает схожие зависимости и позволяет определить пик температуры стенки и ее «впадину» в «области псевдофазового перехода», но по значениям температуры стенки существует достаточно существенная разница. Эта разница обусловлена главным образом особенностями использования соотношения Диттуса-Болтера при расчете свойств воды вблизи «области псевдофазового перехода», где существует значительное отклонение от экспериментальных данных. Если при малых тепловых потоках отклонения незначительны, то при больших они весьма серьезны. Для качественного изучения механизма теплоотдачи в области сверхкритического давления воды программа RELAP5 подходит, но для получения более точных значений (по отношению к экспериментальным) стоит рассмотреть возможность модернизации свойств и соотношений, используемых для расчета теплоотдачи в рассматриваемом диапазоне свойств в данном программном коде. Очевидна потребность в наращивании качественной экспериментальной базы и проведении дальнейших работ по

модернизации расчетных кодов и их верификации применительно к работе в условиях сверхкритического давления воды.

Список источников

1. Kirillov P.L. Bogoslovskaya G.P. Generation IV supercritical water-cooled nuclear reactors: Realistic prospects and research program. Nuclear Energy and Technology, 2019, vol. 5, no. 1, pp. 67-74, DOI: 10.3897/nucet.5.34293.
2. Duffey R.B., Piroo I.L. Supercritical water-cooled nuclear reactors: review and status. Nuclear Materials and Reactors from Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Oxford, UK, 2005, vol. 9.
3. Курганов В.А. Теплообмен и сопротивление в трубах при сверхкритических давлениях теплоносителя / В.А. Курганов, Ю.А. Зейгарник, И.В. Маслакова, Ф.П. Иванов. – Препринт ОИВТ РАН, 2011. – №2-507.
4. Zvorykin A. et al. Specifics of heat transfer to supercritical water flowing in short vertical 7-rod bundle. The Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering (ICONE) 2019, The Japan Society of Mechanical Engineers, 2019, p. 1916, DOI: 10.1299/jsmeicone.2019.27.1916.
5. Деев В.И. Режимы теплообмена при движении воды сверхкритических параметров в вертикальных каналах / В.И. Деев // Теплоэнергетика, 2017. – №. 11. – С. 75-83. DOI: 10.1134/S0040363617110030
6. Грабежная В.А. Теплообмен при сверхкритических давлениях границы ухудшения теплообмена / В.А. Грабежная, П.Л. Кириллов // Теплоэнергетика, 2006. – №. 4. – С. 46-51.
7. Koshizuka S., Takano N., Oka Y. Numerical analysis of deterioration phenomena in heat transfer to supercritical water. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, vol. 38, no.16, pp. 3077-3084, DOI: 10.1016/0017-9310(95)00008-W.
8. Yongliang L. et al. Experimental research on heat transfer of supercritical water upflowing in vertical. Proc. ISSCWR 5, 2011.
9. RELAP5/mod3.2 code manual. Volume I-VII. NUREG/CR-5535 INEL 95/0174, June 1995 г.
10. Moore K.V. ASTEM: A collection of fortran subroutines to evaluate the 1967 asme equations of state for water/STEAM and derivatives of these equations, Aerojet Nuclear Co., Idaho Falls, Idaho, 1971, no. ANCR-1026.
11. Dittus F. W. Heat transfer in automobile radiators of the tubler type. Univ. Calif. Pubs. Eng., 1930, vol. 2, 443p.
12. Mokry S. J. et al. Supercritical water heat transfer in a vertical bare tube: normal, improved, and deteriorated regimes. Nuclear technology, 2010, vol. 172, no. 1, pp. 60-70, DOI: 10.13182/NT10-A10882.
13. Cheng X., Yang Y. H., Huang S. F. A simplified method for heat transfer prediction of supercritical fluids in circular tubes. Annals of Nuclear Energy, 2009, vol. 36, no. 8, pp. 1120-1128, DOI: 10.1016/j.anucene.2009.04.016.

Суджян Артавазд Манукович. Инженер кафедры теплофизики НИЯУ МИФИ, младший научный сотрудник НИЦ КИ, AuthorID: 1133311, SPIN-код: 2947-4122, ORCID: 0000-0001-6943-9220, artavazd1994@gmail.com, Россия, Москва.

Осипов Алексей Михайлович. К.т.н., начальник отдела НИЦ КИ, ORCID: 0000-0001-6228-2697, Osipov_AM@nrcki.ru, Россия, Москва.

UDC 536.24.083

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.009

Application of computer science on the example of the RELAP5 program code for the computational reproduction of experiments on the study of heat transfer in pipes with supercritical pressure water

Artavazd M. Sujyan, Aleksey M. Osipov

National Research Center «Kurchatov Institute»,

Russia, Moscow, artavazd1994@gmail.com

Abstract. Computational studies of thermal-hydraulic processes in the core of nuclear reactors with supercritical water coolant are of high importance, especially at the stage of concept development of such reactors. At the same time, the complexity of determining the water properties at supercritical parameters leads to the need for further development of thermal-hydraulic models and forecasting tools, for which one has to turn to modern computer science and information systems. Such studies are necessary in justifying the safety of nuclear reactor concepts with supercritical coolant parameters. As a part of the safety justification for pressurized water reactors,

the RELAP5 program code has been widely used. When performing calculations, the correlations used in the program code to describe the heat transfer process between the wall and the liquid are extremely important. In order to assess the correctness of the data on heat transfer in pipes and bundles with supercritical water used in RELAP5 code, a reproduction of an experiment on heat transfer in the vertical pipe was performed. The series of calculations for the wall and the coolant temperatures at the pressures of 23 and 25 MPa and various heat fluxes in the range from 600 kW/m² to 1100 kW/m² have been performed. The results of the experiment are compared with the results of its computational reproduction. The calculated and experimental results are compared with the theoretical characterization of heat transfer mechanism in supercritical pressure water.

Keywords: nuclear reactor, computer science, information systems, supercritical water coolant, heat transfer, RELAP5

References

1. Kirillov P.L. Bogoslovskaya G.P. Generation IV supercritical water-cooled nuclear reactors: Realistic prospects and research program. Nuclear Energy and Technology, 2019, vol. 5, no. 1, pp. 67-74, DOI: 10.3897/nucet.5.34293.
2. Duffey R.B. Pioro I.L. Supercritical water-cooled nuclear reactors: review and status. Nuclear Materials and Reactors from Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Oxford, UK, 2005, vol. 9.
3. Kurganov V.A., Zeigarnik Y.A., Maslakova I.V., Ivanov F.P. Teploobmen i soprotivlenie v trubah pri sverhkriticheskikh davleniyah teplonositelya [Heat transfer and resistance in pipes at supercritical coolant pressures]. Preprint OIVT RAN №2-507, 2011.
4. Zvorykin A. et al. Specifics of heat transfer to supercritical water flowing in short vertical 7-rod bundle. The Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering (ICONE) 2019, The Japan Society of Mechanical Engineers, 2019, p. 1916, DOI: 10.1299/jsmeicone.2019.27.1916.
5. Deev V.I. et al. Rezhimy teploobmena pri dvizhenii vody sverhkriticheskikh parametrov v vertikal'nyh kanalah [Heat transfer regimes during the movement of water of supercritical parameters in vertical channels]. Teploenergetika [Thermal power engineering], 2017, no. 11, pp. 75-83, DOI: 10.1134/S0040363617110030
6. Grabezhnaya V.A., Kirillov P.L. Teploobmen pri sverhkriticheskikh davleniyah granicy uhudsheniya teploobmena [Heat transfer at supercritical pressures, boundaries of heat transfer deterioration]. Teploenergetika [Thermal power engineering], 2006, no. 4, pp. 46-51.
7. Koshizuka S., Takano N., Oka Y. Numerical analysis of deterioration phenomena in heat transfer to supercritical water. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, vol. 38, no.16, pp. 3077-3084, DOI: 10.1016/0017-9310(95)00008-W.
8. Yongliang L. et al. Experimental research on heat transfer of supercritical water upflowing in vertical. Proc. ISSCWR 5, 2011.
9. RELAP5/mod3.2 code manual. Volume I-VII. NUREG/CR-5535 INEL 95/0174, June 1995 г.
10. Moore K.V. ASTEM: A collection of fortran subroutines to evaluate the 1967 asme equations of state for water/STEAM and derivatives of these equations, Aerojet Nuclear Co., Idaho Falls, Idaho, 1971, no. ANCR-1026.
11. Dittus F. W. Heat transfer in automobile radiators of the tubler type. Univ. Calif. Pubs. Eng., 1930, vol. 2, 443p.
12. Mokry S. J. et al. Supercritical water heat transfer in a vertical bare tube: normal, improved, and deteriorated regimes. Nuclear technology, 2010, vol. 172, no. 1, pp. 60-70, DOI: 10.13182/NT10-A10882.
13. Cheng X., Yang Y. H., Huang S. F. A simplified method for heat transfer prediction of supercritical fluids in circular tubes. Annals of Nuclear Energy, 2009, vol. 36, no. 8, pp. 1120-1128, DOI: 10.1016/j.anucene.2009.04.016.

Sujyan Artavazd Manukovich. Engineer of the Department of Thermal Physics, National Research Nuclear University MEPhI, Junior Researcher, NRC KI, AuthorID: 1133311, SPIN: 2947-4122, ORCID: 0000-0001-6943-9220, ar-tavazd1994@gmail.com, Russia, Moscow.

Osipov Aleksey Mikhailovich. Ph.D., Head of Department, NRC KI, ORCID: 0000-0001-6228-2697, Osipov_AM@nrcki.ru, Russia, Moscow.

Статья поступила в редакцию 15.07.2022; одобрена после рецензирования 14.09.2022; принята к публикации 19.09.2022.

The article was submitted 07/15/2022; approved after reviewing 09/14/2022; accepted for publication 09/19/2022.