

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

УДК 621.039.51;004.942

РАЗРАБОТКА ОДНОМЕРНОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОГИДРАВЛИКИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ РЕАКТОРА С ПАРОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

© 2020 г. А. М. Суджян^а*, В. С. Харитонов^а, А. А. Фролов^б

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Каширское шоссе, 31, Москва, 115409 Россия

^бНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”,
пл. Академика Курчатова, 1, Москва, 123182 Россия

*E-mail: artavazd1994@gmail.com

Поступила в редакцию 04.03.2021 г.

После доработки 11.05.2021 г.

Принята к публикации 12.05.2021 г.

В данной статье представлены результаты разработки одномерной модели теплогидравлики активной зоны реактора с паровым теплоносителем сверхкритического давления (типа ПСКД-600), предназначенной для анализа теплогидравлической устойчивости. Для ее создания был выбран подход, предполагающий использование модифицированного полунейвного алгоритма на базе SIMPLE. Алгоритм был реализован с помощью программного кода на языке C++. Объектом исследования являлся одиночный канал с круглым сечением, внутри которого размещены ТВС шестигранной формы. Проводился расчет, имитирующий процесс запуска реактора и его выход на стационарный режим работы. Расчет проводился в два этапа: на первом происходило установление восходящего потока теплоносителя в необогреваемом канале, на втором, в момент времени 0.2 с начинался обогрев системы, что привело к перестроению полей скорости, давлений и температур. Модель включила в себя уравнения сохранения импульса, массы и энергии теплоносителя в активной зоне, представленные в виде конечных разностей. Все необходимые для расчета свойства парового теплоносителя сверхкритического давления были получены с помощью библиотеки IAPWS-IF97. Алгоритм предполагает решение основных уравнений теплогидравлики с проверкой неразрывности потока дважды на одном шаге по времени. По итогам расчета получена картина установления полей скорости, давления и температур. С помощью теплового баланса был сделан вывод о корректной работе модели и возможности ее применения для анализа устойчивости реактора с паровым теплоносителем сверхкритического давления.

Ключевые слова: реактор, сверхкритическое давление, теплогидравлическая устойчивость, активная зона, ПСКД-600, алгоритм SIMPLE

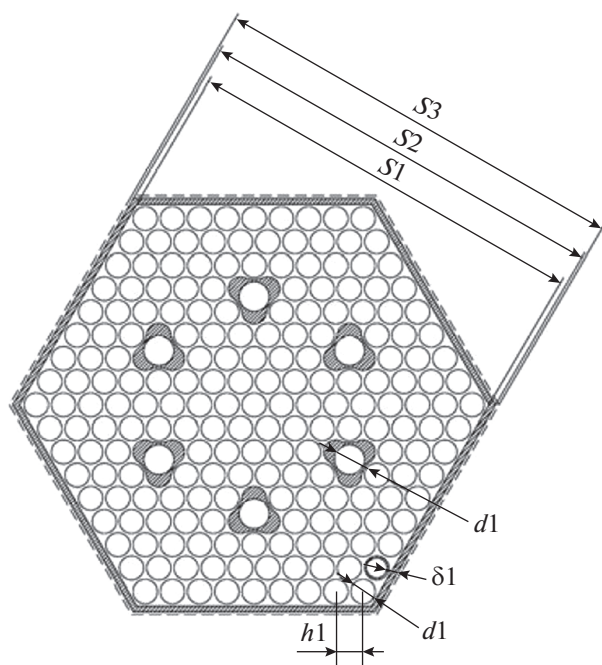
DOI: 10.1134/S2079562920060561

ВВЕДЕНИЕ

Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) способствует международному сотрудничеству в области передовых технологий [1]. Дорожная карта технологий для разработки концепций SCWR была обновлена для определения ключевых технологических направлений. Ключевыми технологическими задачами по-прежнему являются выбор материалов, водно-химический режим, теплогидравлика и безопасность. Одной из подзадач, относящихся к теплогидравлике и безопасности, является анализ устойчивости работы ядерных реакторов с теплоносителями сверхкритического давления. Явление неустойчивости расхода теплоносителя может происходить при вносимых в

систему возмущениях. Существует две основных группы теплогидравлической неустойчивости: апериодическая, связанная с многозначностью гидродинамической характеристики канала, и периодическая (колебательная), возникающая при течении сверхкритического теплоносителя в обогреваемом канале [2].

Разработка численной модели, описывающей движение сжимаемой среды, является достаточно сложной задачей. Во многих коммерческих кодах используется стандартный алгоритм SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) для связи давления и скорости [3, 4], но при его применении для численного анализа нестационарных течений сжимаемых теплоноси-



$S1 = 141.6 \text{ мм}$	$h1 = 9.42 \text{ мм}$
$S2 = 144.6 \text{ мм}$	$d1 = 8.4 \text{ мм}$
$S3 = 146.6 \text{ мм}$	$\delta 1 = 0.6 \text{ мм}$

Рис. 1. Картограмма ТВС активной зоны ПСКД-600 [6].

телей в обогреваемых каналах, когда свойства среды сильно зависят не только от температуры, но и от давления в системе, возникает проблема сходимости результатов расчета. В воде сверхкритического давления теплофизические сильно меняются в зависимости от температуры, что существенно усложняет задачу обеспечения сходимости расчетных данных.

Данная работа посвящена методике разработки одномерной модели теплогидравлики активной зоны предназначенной для анализа динамики и устойчивости реактора типа ПСКД-600 [5], а также модификации алгоритма SIMPLE с целью повышения его сходимости.

МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛИ ТЕПЛОГИДРАВЛИКИ

Активная зона, составленная из ТВС шестигранной формы (рис. 1) моделируется одним эквивалентным каналом. Расчетный участок схематично представлен на рис. 2.

Математическое описание модели строится на трех одномерных уравнениях теплогидравлики: сохранения импульса, массы, и энергии сверхкритического легководного теплоносителя (1)–(3):

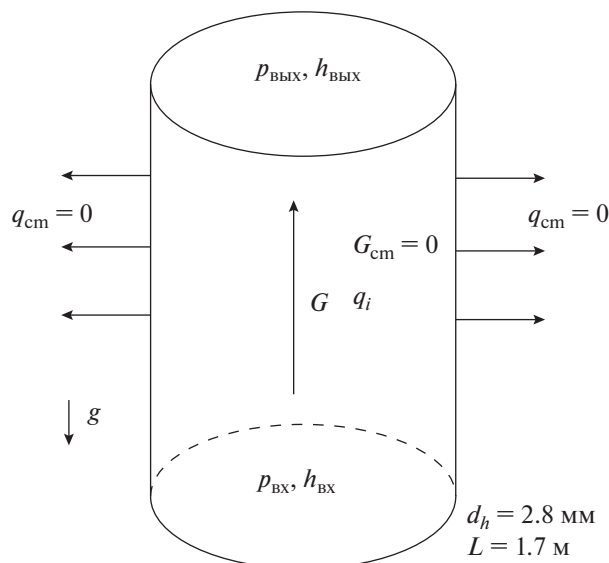


Рис. 2. Схема объекта исследования.

$$\frac{\partial G}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{G^2}{\rho} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} - \left(\frac{fr}{d_h} + \zeta_{in} \delta(z, 0) + \zeta_{out} \delta(z, L) \right) \left(\frac{G^2}{2\rho} \right) G - \rho g, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial G}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial \tau} + \frac{\partial(Gh)}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{q_l}{A}. \quad (3)$$

Здесь τ — время, z — координата, вдоль которой производится расчет, ρ , p , h — плотность, давление и энтальпия теплоносителя соответственно, T — температура теплоносителя, а μ — его динамическая вязкость. Гидравлический диаметр канала — d_h , A — сечение канала, g — ускорение свободного падения, δ — дельта функция, G — массовая скорость теплоносителя, fr — коэффициент трения, ζ_{in} , ζ_{out} — коэффициенты местного сопротивления на входе и на выходе соответственно, q_l — линейное энерговыделение. Граничные условия — фиксированные значения давлений на концах расчетного участка, (24.5 МПа и 24.3 МПа соответственно) и нулевая вторая производная массовой скорости по направлению. Начальные условия — нулевая скорость теплоносителя, линейное распределение давления от входа в расчетный участок к его выходу, начальная энтальпия 2400 кДж/кг. Значения взяты из основных характеристик активной зоны концепции реактора ПСКД-600, они представлены в табл. 1.

Плотность теплоносителя определяется из уравнения состояния с помощью библиотеки свойств IAPWS-IF97 [6] как функция (4):

Таблица 1. Основные параметры активной зоны ПСКД-600

Параметр	Значение
Тепловая мощность, МВт	1430
Электрическая мощность, МВт	600
КПД, %	40.2
Давление на входе/выходе, МПа	24.5/24.3
Диаметр активной зоны с БЗВ/без БЗВ, м	3/3.2
Высота активной зоны, м	1.7 (без ТЗВ)
Температура теплоносителя на входе/выходе, °С	388/500
Расход теплоносителя, кг/с	1880
Число ТВС без БЗВ/с БЗВ	349/421

$$\rho = \rho(p, h). \quad (4)$$

Аналогичным образом определяется температура $T(p, h)$, динамическая вязкость $\mu(T, p)$, производная $\left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_h(T, p)$. Коэффициент трения определяется по формулам (5)–(7) [7]:

$$fr_0 = \frac{0.21}{Re^{0.25}} \left[1 + \left(\left(\frac{s}{d} \right) - 1 \right)^{0.32} \right], \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{fr}{fr_0} &= 1 + f \left(\left(\frac{s}{d} \right) - 1 \right) Re^{0.038} \frac{fr}{fr_0} \\ &= 1 + f \left(\left(\frac{s}{d} \right) - 1 \right) Re^{0.038} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} f &= 30.3956 - 4.5911 \left(\frac{h}{d} \right) + \\ &+ 0.25308 \left(\frac{h}{d} \right)^2 - 4.2955 \cdot 10^{-3} \left(\frac{h}{d} \right)^3, \end{aligned} \quad (7)$$

где s — шаг решетки ТВС, h — шаг проволоочной навивки, d — диаметр твэла.

Влияние переменности теплофизических свойств воды на коэффициент сопротивления учитывается в расчетной формуле (8) поправкой в виде отношения плотности воды при средних значениях температуры стенки и жидкости:

$$\frac{fr}{fr_{из}} = \left(\frac{\rho_c}{\rho_j} \right)^{0.4}, \quad (8)$$

причем коэффициент сопротивления при изотермическом турбулентном течении $fr_{из}$ желательно определять по формуле (9):

$$fr_{из} = (1.82 \lg Re - 1.64)^{-2}. \quad (9)$$

Вместе с тем, в настоящее время недостаточно данных для расчета коэффициента гидравлического сопротивления при обтекании пучков стержней с проволоочной навивкой потоком воды сверхкритического давления. Поэтому, на данном этапе воз-

можно использование соотношений, разработанных для изотермических условий. Так как коэффициент сопротивления рассчитывается для каждого контрольного объема, а не для всей активной зоны, то это позволяет приближенно учесть влияние изменения свойств.

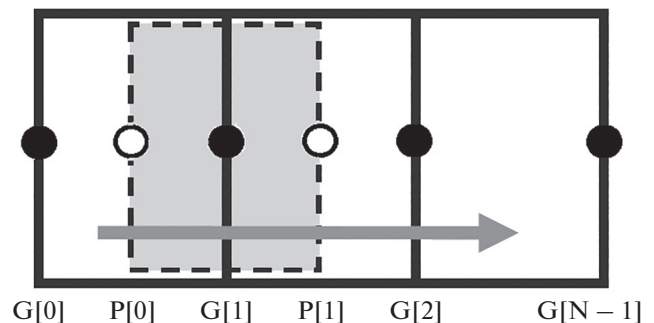
Для устранения сложностей аппроксимации градиента давления и уравнения неразрывности использован классический подход с применением шахматной сетки. При этом контрольные объемы для расчета скалярных и векторных величин смещены по отношению друг к другу. Пример шахматной сетки представлен на рис. 3.

С учетом используемой сетки уравнения (1)–(3) в конечных разностях можно записать следующим образом (10)–(12):

$$\begin{aligned} (G_i - G_i^0) \left(\frac{\Delta z}{\Delta \tau} \right) + \left(\frac{G_{i+1} + G_i}{2\rho_{i+1}} \right) G_i - \left(\frac{G_i + G_{i-1}}{2\rho_i} \right) G_{i-1} = \\ = p_i - p_{i+1} - \left(\frac{fr}{d_h} + \zeta_{in} \delta(z, 0) + \zeta_{out} \delta(z, L) \right) \times \end{aligned} \quad (10)$$

$$\times \left(\frac{G_i \Delta z}{2\rho_i} \right) G_i - \rho_i g \Delta z,$$

$$(\rho_i^0 - \rho_i) \left(\frac{\Delta z}{\Delta \tau} \right) + G_{i-1} - G_i = 0, \quad (11)$$

**Рис. 3.** Шахматная сетка для расчета скалярных и векторных полей.

$$\begin{aligned} (\rho_i h_i - \rho_i^0 h_i^0) \left(\frac{\Delta z}{\Delta \tau} \right) + (G_i h_i - G_{i-1} h_{i-1}) = \\ = (p_i - p_i^0) \left(\frac{\Delta z}{\Delta \tau} \right) + \frac{q_l}{A} \Delta z. \end{aligned} \quad (12)$$

Алгоритм подразумевает циклы коррекции давления до достижения критерия неразрывности. Выразив составляющие скорости в уравнении сохранения массы через коррекции массовой скорости (13), учитывая изменение плотности в зависимости от изменения давления, а также, что истинное значение величины равно сумме ее предполагаемого значения и коррекции, можно получить уравнение коррекции давления (14) в виде:

$$G_i' = \frac{p_i' - p_{i+1}'}{\left(\frac{\Delta z}{\Delta \tau} \right) + \left(\frac{G_{i+1} + G_i}{2\rho_{i+1}} \right) + \left(\frac{fr}{d_h} \right) \left(\frac{G_i \Delta z}{2\rho_i} \right)}, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \left(\rho_i^* + \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_h p_i' - \rho_i^0 \right) \left(\frac{\Delta z}{\Delta \tau} \right) + G_i^* + \\ + G_i' - G_{i-1}^* - G_{i-1}' = 0, \end{aligned} \quad (14)$$

где индексы “*” и “'” означают текущее известное значение и его коррекцию соответственно. Местные сопротивления на входе и выходе не учитываются в (13), так как коррекции не считаются на границах в условиях фиксированных граничных давлений.

АЛГОРИТМ И ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Программный код, воспроизводящий одномерную модель теплогидравлики, был разработан с использованием языка программирования C++. Для корректной работы программы и получения правильных полей давления и скорости необходимо было использовать модифицированный алгоритм, подходящий для использования при анализе течения сжимаемых теплоносителей в обогреваемых каналах. С этой целью был создан модифицированный алгоритм, основанный на ключевых принципах SIMPLE. Основные его пункты можно представить в следующем виде.

1. Постановка начальных условий (начальные распределения полей массовой скорости, давления, энтальпии и других свойств), граничных условий, а также определение необходимых для расчета параметров (числа Рейнольдса, гидравлические сопротивления и т. д.).

2. Решение уравнения энергии для уточнения поля энтальпий (а значит и температур) при заданных начальных условиях, обновление свойств.

3. Цикл неразрывности, то есть итерации до достижения значений массовых скоростей и давлений, соответствующих условию неразрывности, обновление свойств. На итерациях происходит

последовательное решение системы уравнений сохранения импульса и системы уравнений коррекций давления (расчет необходимых коэффициентов и подстановка их в матрицу с последующим решением системы уравнений методом прогонки трехдиагональной матрицы).

4. Решение уравнения энергии для перерасчета поля энтальпий (а значит и температур) при новых полях давления и массовых скоростей, обновление свойств.

5. Повторение пункта (3) для уточнения полей давлений и массовых скоростей, обновление свойств.

Цикл неразрывности выполнялся либо до достижения 100 итераций, либо до получения порогового значения разбаланса массы 10^{-6} . Таким образом, время до установления номинального режима реактора составило около 6000 с. Модификация алгоритма заключается в том, что решение уравнения энергии и последующий цикл неразрывности реализованы дважды на одном шаге по времени. Также в уравнении массы учтена сжимаемость теплоносителя, что влияет на величину коррекции давления. Для расчета выбраны значения пространственного и временного шага 0.1 м и 0.1 мс соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчет был проведен для модели активной зоны, охлаждаемой восходящим потоком теплоносителя. Высота активной зоны, ее проходное сечение и гидравлический диаметр с учетом расположения ТВС равны $L = 1.7$ м, $A = 1.776$ м² и $d_h = 2.8$ мм соответственно. В качестве граничных условий были заданы давления на входе $p_{вх} = 24.5$ МПа и выходе $p_{вых} = 24.3$ МПа. Начальное распределение давлений – линейно убывающее с одинаковой разницей давлений между соседними точками. Энтальпия задана постоянной в “фиктивном” контрольном объеме перед входом в активную зону $h_{-1} = 400$ кДж/кг, это значение является начальным по всей длине. Далее энтальпия рассчитывалась во всех точках с помощью уравнения энергии. Граничные условия для массовой скорости

представлены в виде $\frac{\partial^2 G}{\partial z^2} = 0$, в начальный момент массовые скорости нулевые. Тепловой поток через стенку, ограничивающую расчетный участок, $q_{ст} = 0$, то есть выполняются адиабатические условия. Также выполнено условие прилипания, массовая скорость на стенке $G_{ст} = 0$.

Был смоделирован процесс запуска реактора с установлением течения теплоносителя, установлением полей давления и энтальпии, а также выходом на устойчивое стационарное состояние. Это необходимо, так как временной метод анализа

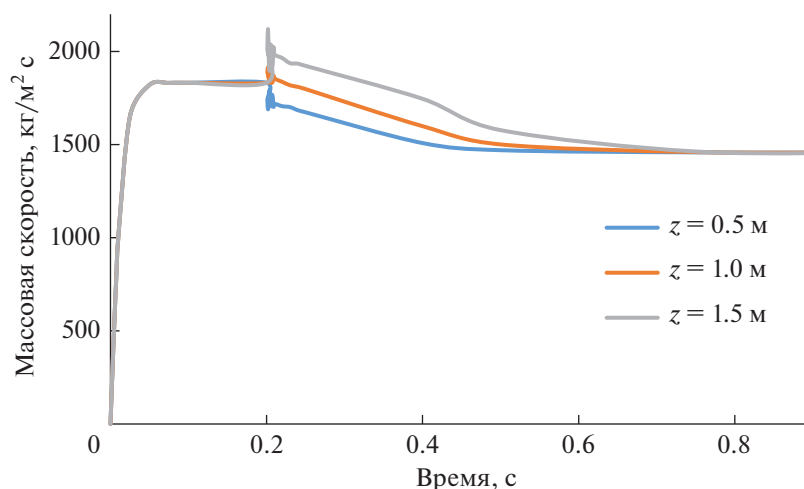


Рис. 4. Установление массовой скорости теплоносителя.

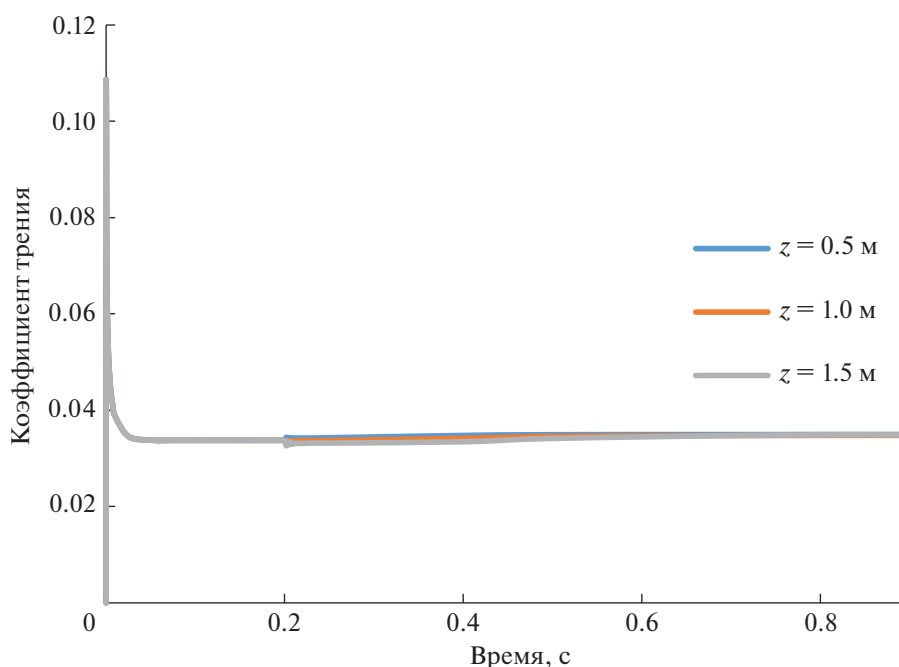


Рис. 5. Изменение коэффициента трения в процессе установления течения.

устойчивости предполагает проверку реакции системы, находящейся в стационарном состоянии, на внесенные возмущения. Внутреннее энерговыделение в активной зоне “включалось” в момент времени 0.2 с , когда течение достаточно установившееся, чтобы избежать неустойчивостей.

По итогам расчета процесса установления полей скорости, давления и энтальпии получены следующие зависимости. На рис. 4 представлено установление массовой скорости теплоносителя во времени. На рис. 5 аналогичным образом показано изменение коэффициента трения. Также на рис. 6 и 7

показано установление плотности и температуры теплоносителя соответственно. Результаты представлены для трех разных точек по высоте активной зоны: 0.5 , 1 и 1.5 м .

Из приведенных зависимостей видно, что система приходит в стационарное состояние. Критерием сходимости расчета являлась невязка уравнения массы. Сходимость выполнялась при достижении величины невязки значений ниже 10^{-6} . Значения невязок установились на уровне порядка 10^{-8} , что свидетельствует о сходимости расчета. При нагреве системы можно наблюдать небольшие осцилляции

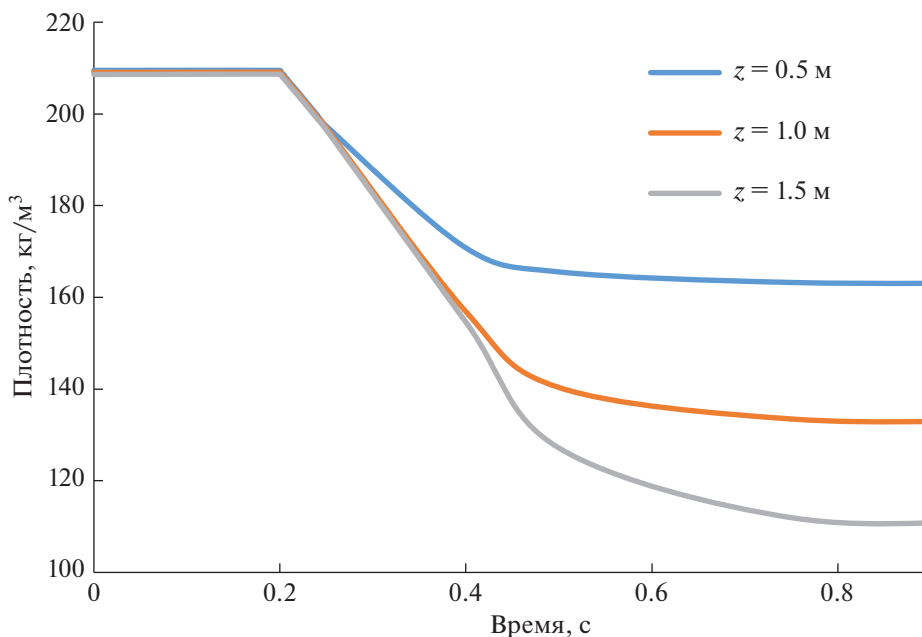


Рис. 6. Установление плотности теплоносителя.

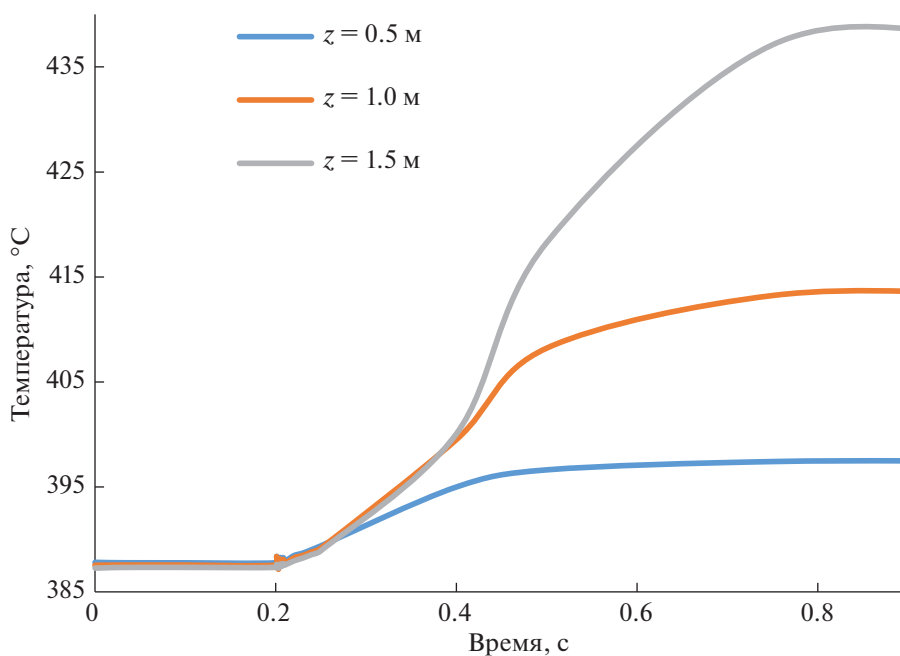


Рис. 7. Установление температуры теплоносителя.

параметров. Ярче всего это проявляется для массовой скорости. Проверка адекватности работы модели выполнена с помощью теплового баланса. Расчетное значение тепловой мощности, выделенной в активной зоне, составило 1388 МВт при заданном значении 1430 МВт (то есть относительная погрешность составила около 3%). Проверка

показала, что величина погрешности напрямую зависит от степени грубости сетки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана одномерная модель теплогидравлики активной зоны реактора с паровым теплоноси-

телем сверхкритического давления типа ПСКД-600, представленная одиночным каналом. Для моделирования разработан и использован модифицированный полунявный алгоритм на основе SIMPLE. В отличие от классического SIMPLE, он предполагает решение уравнений теплогидравлики с проверкой неразрывности потока дважды на одном шаге по времени, а также учитывает эффект сжимаемости потока теплоносителя. Результаты тестирования показали, что критерий сходимости выполняется. Использование данной модификации алгоритма позволяет обеспечить более устойчивый расчет и повысить скорость сходимости. Из приведенных выше графиков видно, что система с течением времени приходит к стационарному состоянию. Проверка теплового баланса позволяет сделать вывод о том, что приведенный алгоритм работает корректно и подходит для исследования динамики и устойчивости реактора с паровым теплоносителем сверхкритического давления. Важно отметить, что исследование устойчивости предпочтительнее проводить на примере модели контура с активной зоной, представленной системой параллельных каналов. Однако, разработка модели эквивалентного канала активной зоны является важным первоначальным шагом обобщенного анализа устойчивости, после которого модель можно расширить и перейти к рас-

смотрению устойчивости в параллельных каналах активной зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Ambrosini W. et al.* Understanding and Prediction of Thermohydraulic Phenomena Relevant to Supercritical Water Cooled Reactors (SCWRs)-Final Report of a Coordinated Research Project. 2020.
2. *Ягов П.В., Чуркин А.Н., Мохова О.В.* // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. 2011. № 29. С. 82–91.
3. *Asako Y., Sharma M.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 126. P. 425–431.
4. *Patankar S.V.* Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. 2018. Boca Raton: CRC Press. eBook. <https://doi.org/10.1201/9781482234213>
5. *Алексеев П.Н. и др.* Изучение влияния состава топлива на значение пустотного эффекта реактивности для активной зоны реактора ПСКД-600 с быстрым спектром нейтронов. 2011. Подольск: ОКБ “ГИДРО-ПРЕСС”. Конференция Молодых Специалистов. Т. 15.
6. <https://github.com/CoolProp/IF97>.
7. *Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С.* Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике / ред. Кириллов П.Л. 2010. Москва: ИздАТ. Т. 1: Теплогидравлические процессы в ЯЭУ.

Development of a One-Dimensional Thermal-Hydraulics Model Intended for Studying Stability of a Reactor with a Supercritical Steam Coolant

A. M. Sujyan^{1, *}, V. S. Kharitonov¹, and A. A. Frolov²

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoe sh. 31, Moscow, 115409 Russia

²National Research Center “Kurchatov Institute”, pl. Akademica Kurchatova 1, Moscow, 123182 Russia

*e-mail: artavazd1994@gmail.com

Received March 3, 2021; revised May 11, 2021; accepted May 12, 2021

This article presents the results of the development of one-dimensional thermal-hydraulics model of the reactor core with a supercritical steam coolant (SCPS-600 type), intended for the analysis of thermal-hydraulic stability. To create it, an approach was chosen that involves the use of a modified semi-implicit algorithm based on SIMPLE. The algorithm was implemented using C++ software. The object of the study was a single channel with a circular cross-section with the fuel assemblies of a hexagonal shape in it. A calculation was carried out that simulates the process of starting the reactor and its reaching the steady state mode. The calculation was carried out in two stages: at the first stage, the ascending flow was established in the unheated channel; at the moment of time 0.2 s, the heating of the system began, which led to a rearrangement of the velocity, pressure and temperature fields. The model included the conservation of momentum, and the energy of the coolant in the core, presented as finite differences. All the properties of the supercritical steam coolant required for the calculation were obtained using the IAPWS-IF97 library. The algorithm assumes solution of the basic equations of thermal-hydraulics with continuity check twice at one time step. Based on the results of the calculation, a picture of the fields of velocity, pressure and temperature was obtained. With the help of the heat balance, a conclusion was made about the correct operation of the model and the possibility of its application for the analysis of the stability of a reactor with a supercritical steam coolant.

Keywords: reactor, supercritical pressure, thermal-hydraulic stability, core, SCPS-600, SIMPLE algorithm