

Одномерная модель теплогидравлики в канале с водой при сверхкритических параметрах

Суджян Артавазд Манукович¹, Берберова Мария Александровна², Железняков Родион Алексеевич², Хачатрян Артур Алексеевич², Лазарев Алексей Юрьевич², Магомедов Раджаб Ибрагимович², Юдин Владимир Михайлович²

¹Курчатовский институт, Россия, Москва, artavazd1994@gmail.com

²МИРЭА – Российский технологический университет, Россия, Москва

Аннотация. В работе представлен подход, использованный для создания одномерной модели теплогидравлики в одиночном нагреваемом канале с водой при сверхкритических параметрах. Такая модель может быть использована при решении задачи поиска границ теплогидравлической устойчивости. Подход основан на принципах, заложенных в полуневяном алгоритме SIMPLE. Модель включает в себя уравнения сохранения массы, импульса и энергии, учитывающие сжимаемость среды. Реализация модели выполнена с помощью программного кода собственной разработки на языке C++. Для определения теплофизических свойств воды использована библиотека IAPWS-IF97, реализованная в высокопроизводительном пакете `seuif97`. Для расчета коэффициента гидравлического сопротивления в программе имеется несколько корреляций, для тестирования модели выбрана формула Блазиуса. Представленный подход предполагает решение основных уравнений теплогидравлики с проверкой неразрывности потока четыре раза на одном шаге по времени. Цикл неразрывности завершается при достижении разбаланса массы, равного 10^{-6} , либо при достижении 10 итераций. Продемонстрированы результаты тестирования модели.

Ключевые слова: модель теплогидравлики, сверхкритические параметры, нагреваемый канал, алгоритм SIMPLE, сжимаемость среды, теплогидравлическая устойчивость

Цитирование: Суджян А.М. Одномерная модель теплогидравлики в канале с водой при сверхкритических параметрах / А.М. Суджян, М.А. Берберова, Р.А. Железняков, А.А. Хачатрян, А.Ю. Лазарев, Р.И. Магомедов, В.М. Юдин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 3 (39). – С. 104-113. – DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.009.

Введение. Разработка моделей процессов, протекающих в нагреваемых каналах с водой при сверхкритических параметрах, в особенности для условий, близких к границам теплогидравлической устойчивости, требует значительного количества расчетных и экспериментальных работ. Такие модели необходимы, в том числе, на этапе проектирования ядерных энергетических установок с легководным теплоносителем сверхкритического давления [1], в активных зонах которых теплофизические параметры могут подвергаться значительным изменениям [2].

Основные существующие результаты численного и экспериментального исследования теплогидравлической устойчивости в каналах с водой при сверхкритических параметрах представлены в работах [3] и [4].

Авторы [3] обобщили существующие критерии устойчивости, математические модели и экспериментальные данные, подчеркнув ключевые факторы, влияющие на развитие колебательных процессов в высокотемпературных теплообменных системах. Были рассмотрены также эффекты геометрии каналов, способов нагрева, режимов теплообмена и свойств воды в окрестности критической точки, а также подходы к обеспечению устойчивости при проектировании теплогидравлических систем, включая реакторные установки и теплообменники. Отмечено, что ограниченность экспериментальных данных и существующих моделей делает невозможным точное прогнозирование момента потери теплогидравлической устойчивости, необходимы дальнейшие экспериментальные и численные исследования в широком диапазоне условий.

В работе [4] показано, что предсказание момента потери теплогидравлической устойчивости требует более точных данных о теплообменных процессах и развитии возмущений в условиях сверхкритических параметров. Это указывает на необходимость дальнейших исследований, как в части совершенствования моделей и расчетных методов, так и в проведении экспериментальной валидации полученных результатов.

Резкое изменение свойств теплоносителя наблюдается вблизи области псевдофазового перехода [5], определяемого температурами, при которых удельная теплоемкость достигает резкого максимума при заданном значении давления, превышающего критическое. Поведение свойств вокруг псевдокритической точки показано на рисунке 1.

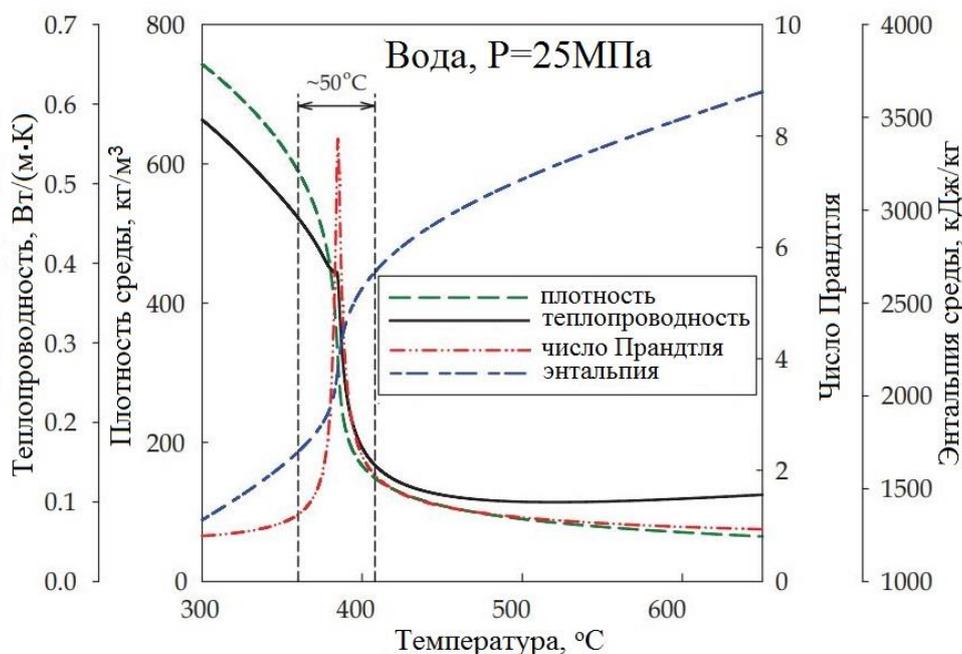


Рис. 1. Изменение некоторых теплофизических свойств воды вблизи псевдокритической точки: псевдокритическая область при 25 МПа составляет около $\pm 25^\circ\text{C}$ вокруг псевдокритической точки

Картина изменения плотности подобна той, которая наблюдается в кипящих системах вследствие образования пустот. Это основная причина предположения о том, что эффекты неустойчивости, аналогичные наблюдаемым в кипящих системах, также могут возникнуть при сверхкритических давлениях.

Возникновение многозначности гидродинамической характеристики канала в статических условиях, а также различные возмущения массового расхода на входе в канал приводят к отклонениям или самоподдерживающимся колебаниям, которые, соответственно, считаются классическими примерами неустойчивости Ледингга или колебаниями «волн плотности» [6].

Таким образом, с целью дальнейшего построения карты устойчивости для определения параметров, соответствующих устойчивым режимам работы, на данном этапе был определен подход к созданию простой одномерной модели, представленной одиночным нагреваемым каналом.

2. Исходная математическая модель. Исходная математическая модель включает в себя три одномерных уравнения сохранения: массы (1), импульса (2) и энергии (3). В них учитывается сжимаемость, характерная для воды при сверхкритических параметрах.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial G}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{G^2}{\rho} \right) - \left(\frac{\lambda}{D_h} + \frac{K_{l\,in}}{\partial z} + \frac{K_{l\,out}}{\partial z} \right) \frac{G^2}{2 \cdot \rho} - \rho \cdot g \cdot \sin \theta \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \cdot h)}{\partial t} = -\frac{\partial(G \cdot h)}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial z} + |u| \left(\frac{\lambda}{D_h} + \frac{K_{l\,in}}{\partial z} + \frac{K_{l\,out}}{\partial z} \right) \frac{G^2}{2 \cdot \rho} - \rho \cdot u \cdot g \cdot \sin \theta + \frac{q_l}{A}, \quad (3)$$

где ρ и G – плотность и массовая скорость теплоносителя соответственно, t – время, z – пространственная координата, p – давление, D_h – гидравлический диаметр канала, λ – коэффициент гидравлического сопротивления, K_l – коэффициент местного сопротивления, g – ускорение свободного падения, θ – угол направления движения потока по отношению к горизонтали, h – энтальпия, u – скорость теплоносителя, A – площадь проходного сечения, q_l – линейное энерговыделение. Индексы «in» и «out» относятся ко входу и выходу канала соответственно и указывают на то, что переменная определена для этих точек, а в остальных она равна нулю. В данной постановке использовано предположение непосредственной добавки энергии к теплоносителю без явного вычисления теплопередачи.

Для замыкания системы (1) – (3) используется уравнение состояния (4):

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

Функция $f(p, h)$ определена в высокопроизводительном пакете стандартных свойств воды и водяного пара IAPWS-IF97 seif97 [7], который находится в открытом доступе и позволяет значительно ускорить расчет.

Для расчета коэффициента гидравлического сопротивления использованы следующие соотношения в зависимости от режима течения [8]. Число Рейнольдса $Re = 2300$, было использовано в качестве границы между ламинарным и турбулентным режимами. Для ламинарного потока ($Re < 2300$) использовалась формула Пуазейля (5):

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (5)$$

Для турбулентного потока ($Re \geq 2300$) предусмотрены две формулы, в зависимости от учета шероховатости канала. В случае пренебрежения шероховатостью ε , используется формула Блазиуса (6), в противном случае – формула Свами-Джейна (7):

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (6)$$

$$\lambda = 0,25 \cdot \left[\log \left(\frac{\varepsilon}{D_h} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2}, \quad (7)$$

для тестирования модели использовалась формула Блазиуса.

3. Подход к моделированию. Подход, использованный для создания рассматриваемой модели, основан на принципах алгоритма SIMPLE [9], широко применяемого для расчета полей скорости и давления потока несжимаемого теплоносителя. Алгоритм SIMPLE представляет собой полуявную численную процедуру для решения уравнений Навье-Стокса. Основные принципы алгоритма SIMPLE заключаются в использовании шахматной сетки и использовании схемы «против потока» для конвективных членов в уравнениях. Шахматная сетка предполагает, что компоненты скорости определены не в центрах контрольных объемов, где определены давления, а на их гранях с разницей в полшага, что напоминает шахматный порядок. Использование такой сетки повышает удобство и точность определения скорости.

Схема с разностями против потока является одношаговой явной схемой, обеспечивающей статическую устойчивость для конвективных членов [10]. В ее основе лежит использование односторонних, а не центральных разностей по пространственным переменным. При положительных значениях скорости используются разности назад и наоборот. Конвективные члены для уравнений (2) и (3) относительно точки j записываются в форме (8) и (9), соответственно:

$$\left(\frac{G_j + G_{j+1}}{2\rho_{j+1}}\right) \times \begin{cases} G_j, \left(\frac{G_j + G_{j+1}}{2\rho_{j+1}}\right) > 0 \\ G_{j+1}, \left(\frac{G_j + G_{j+1}}{2\rho_{j+1}}\right) < 0 \end{cases} - \left(\frac{G_j + G_{j-1}}{2\rho_j}\right) \times \begin{cases} G_{j-1}, \left(\frac{G_j + G_{j-1}}{2\rho_j}\right) > 0 \\ G_j, \left(\frac{G_j + G_{j-1}}{2\rho_j}\right) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$G_j \times \begin{cases} h_j, G_j > 0 \\ h_{j+1}, G_j < 0 \end{cases} - G_{j-1} \times \begin{cases} h_{j-1}, G_{j-1} > 0 \\ h_j, G_{j-1} < 0 \end{cases} \quad (9)$$

Решение уравнений включает в себя их дискретизацию с приведением к конечно-разностному виду, линеаризацию, группировку слагаемых с объединением групп в коэффициенты и последующую подстановку полученных коэффициентов в трехдиагональную матрицу. Матрица представляет собой систему линейных алгебраических уравнений, которая просто решается методом прогонки трехдиагональной матрицы.

Особенностью алгоритма SIMPLE является изменение в форме записи уравнения сохранения массы – оно записывается не относительно плотности теплоносителя, а относительно коррекции давления, которую необходимо провести для получения полей скорости и давления, удовлетворяющих условию неразрывности. Значение плотности теплоносителя заменяется на неизвестное значение коррекции давления. С учетом того, что вода при сверхкритических параметрах сжимаема, уравнения сохранения и подход к их решению несколько отличаются от классического SIMPLE, представляя собой его расширенную версию. Для получения уравнения коррекции давления необходимо учесть:

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right) = \left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_h \cdot \left(\frac{\delta p}{\delta t}\right) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial h}\right)_p \cdot \left(\frac{\delta h}{\delta t}\right), \quad (10)$$

где δp и δh – возмущения по давлению и энтальпии, соответственно, по отношению к начальным, либо взятым с предыдущего шага по времени значениям. Причем, δp , фактически, является искомой коррекцией давления, а частные производные плотности по давлению при постоянной энтальпии и плотности по энтальпии при постоянном давлении – это простые термодинамические производные. Принимая во внимание соотношения (11) и (12) для узла под номером j :

$$G_j = G_j^* + G_j' \quad (11)$$

$$G_j' = \frac{p_j' - p_{j+1}'}{a_j}, \quad (12)$$

исходное уравнение сохранения массы (1) можно записать в следующем виде (1'):

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_{h_j} \cdot p_j' \cdot \frac{\Delta z}{\Delta t} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial h}\right)_{p_j} \cdot \delta h_j \cdot \frac{\Delta z}{\Delta t} + \rho_j^* \cdot \frac{\Delta z}{\Delta t} - \rho_j^0 \cdot \frac{\Delta z}{\Delta t} + \left(G_j^* + \frac{p_j' - p_{j+1}'}{a_j}\right) - \left(G_{j-1}^* + \frac{p_{j-1}' - p_j'}{a_{j-1}}\right) = 0, \quad (1')$$

где индексы «0», «'» и «*» указывают на значение переменной, взятое с предыдущего шага по времени, значение коррекции и текущее известное значение переменной, соответственно.

Основные пункты модифицированной версии алгоритма можно представить в следующем виде:

- 1) описание начальных условий (начальные распределения полей массовой скорости, давления, энтальпии и других свойств), граничных условий, а также определение необходимых для расчета вспомогательных параметров (числа Рейнольдса, гидравлические сопротивления и т. д.);
- 2) решение уравнения сохранения 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.

Проверка неразрывности выполнялась либо до достижения конечного числа итераций, либо до получения порогового значения невязки в уравнении массы 10^{-6} . Максимальное число итераций неразрывности, требовавшихся для расчета, равнялось 10. В зависимости от сложности решаемой задачи алгоритм можно применять несколько раз на одном шаге по времени. На рисунке 2 показана блок-схема описанного алгоритма.

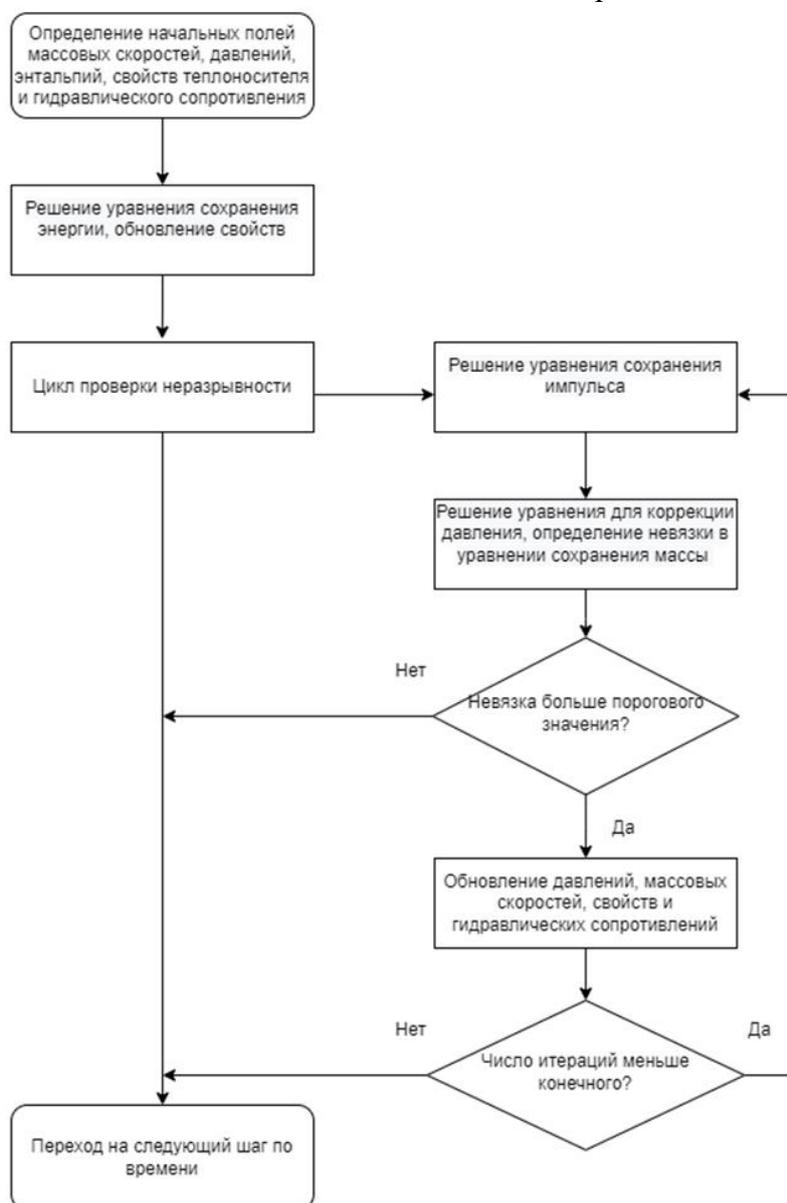


Рис. 2. Блок-схема алгоритма, использованного при моделировании

4. Тестирование модели. Протестировать модель было решено с помощью тестового задания по сравнительной валидации «устойчивость расхода» [11]. Объектом исследования являлась трубка длиной 4,2672 м, с внутренним диаметром $8,36 \times 10^{-3}$ м. Условия задания предполагают, что трубка подвергается равномерному нагреву, расчет предлагается проводить для вертикального и горизонтального положения. На входе в трубку и выходе из нее задаются значения местных сопротивлений, равных 20 и 2, 5, 10, 20 (для разных расчетов) соответственно. Целью задания является проведение серии расчетов переходных процессов, происходящих при увеличении мощности нагрева трубки для разных энтальпий недогрева до псевдокритической точки при заданном давлении 25 МПа на входе в трубку и с различными значениями местного сопротивления на выходе из трубки [12]. По итогу расчета из графиков массового расхода необходимо определить точку начала теплогидравлической неустойчивости, оценить безразмерный параметр изменения состояния потока сверхкритического теплоносителя в результате нагрева N_{tpc} (13):

$$N_{tpc} = \frac{\beta_{pc}}{C_{p,pc}} \frac{Q}{G \cdot A}, \quad (13)$$

где Q – полная подведенная мощность, β – коэффициент температурного расширения, C_p – удельная изобарная теплоемкость, индекс « pc » указывает на значение параметра в псевдокритической точке. Для каждого безразмерного параметра недогрева до псевдокритической температуры N_{spc} (14):

$$N_{spc} = \frac{\beta_{pc}}{C_{p,pc}} (h_{pc} - h_{in}), \quad (14)$$

рассчитываются соответствующие значения N_{tpc} , после чего полученные значения накладываются на графики с абсциссой N_{tpc} и ординатой N_{spc} . Полученная таким образом картина называется картой устойчивости.

В качестве тестового варианта для расчета был выбран вариант с горизонтальным положением трубки. Серия тестовых расчетов была проведена для параметра недогрева до псевдокритической точки, равного 3. Это значение было использовано в качестве модельного примера, для которого предполагалось получить картину неколебательной неустойчивости. С учетом рекомендаций по выполнению расчета на границах трубки были заданы давления 25 МПа и 24,9 МПа соответственно, начальное давление в остальных точках равно давлению на выходе. Энтальпия входа, соответствующая заданному числу недогрева, равна 309,71 кДж/кг, это же значение является начальным по всей длине трубки. Стартовый массовый расход равен нулю. Нагрев производился с самого начала расчета с темпом 200 Вт/с, по примеру, представленному в работе [13]. Также, в работе [13] было определено, что количество контрольных объемов, равное 25, является оптимальным, в следствие чего для текущего исследования было использовано аналогичное пространственное разбиение. Шаг по времени был установлен равным 10^{-4} с.

В качестве результатов приведены зависимости массового расхода от времени, полученные для местных сопротивлений на выходе из канала, равных 5 (рисунок 3) и 10 (рисунок 4).

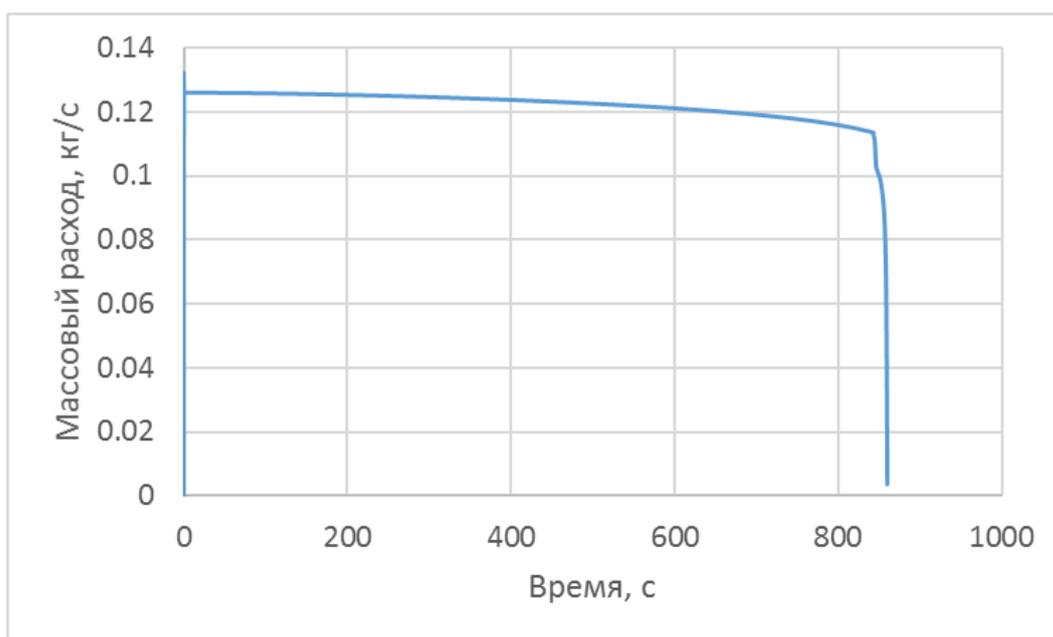


Рис. 3. Изменение массового расхода через горизонтальный канал в процессе нагрева $N_{spc} = 3, K_{lout} = 5$

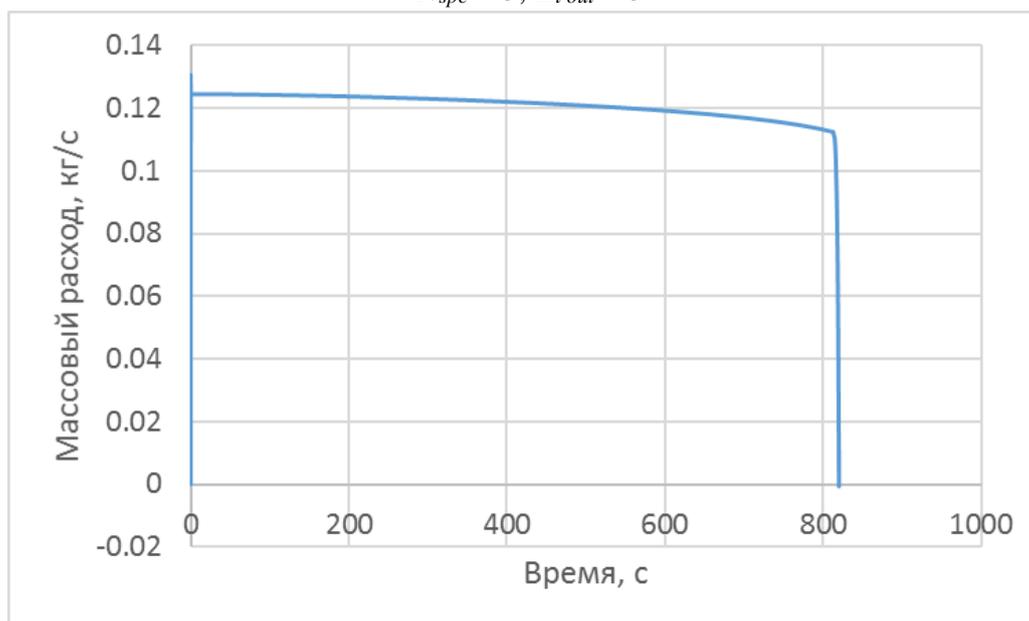


Рис. 4. Изменение массового расхода через горизонтальный канал в процессе нагрева $N_{spc} = 3, K_{lout} = 10$

На рисунках видно резкое падение массового расхода теплоносителя к нулю при заданных параметрах, вместе с этим, отсутствуют колебания массового расхода. На карте устойчивости, приведенной в работе [11], точки, соответствующие этим параметрам также помечены как неколебательные. Авторами работы [13] было высказано предположение о том, что подобная картина могла быть вызвана повышением давления в контрольном объеме, прилегающем к граничному на входе в канал, до такой степени, что перепада давления было недостаточно для преодоления потерь от сил трения и гидравлического сопротивления. Проблема избыточного давления по своей природе аналогична неустойчивости Лединегга в том смысле, что система требует большего давления, чем доступно. Однако, второго ненулевого решения уравнения сохранения импульса не существует. Гораздо чаще такое наблюдается в случаях, когда энтальпия на входе в канал близка к псевдокритической точке.

Значения безразмерного параметра N_{ipc} при значении безразмерного параметра недогрева до псевдокритической температуры $N_{spc} = 3$ для коэффициентов местного сопротивления на выходе из трубки, равных 5 и 10, составили соответственно 2,58 и 2,50. Из полученных результатов тестирования можно сделать заключение о том, что в целом, предложенный подход применим для неколебательных переходных процессов. В дальнейшем необходима его проверка на колебательных переходных процессах, для чего нужно охватить широкий диапазон параметров недогрева до псевдокритической температуры.

Заключение. Предложен подход для создания одномерной модели теплогидравлики в одиночном нагреваемом канале с водой при сверхкритических параметрах. Представлена блок-схема модифицированного полунейного алгоритма на основе SIMPLE, лежащего в основе предложенного подхода и позволяющего проводить расчеты для сжимаемых теплоносителей.

Тестирование модели, построенной с использованием данного подхода, было выполнено по примеру расчетного задания по сравнительной валидации «устойчивость расхода». В качестве модельного примера расчет был выполнен для горизонтального канала с параметром недогрева до псевдокритической температуры, равного 3. При значениях местных сопротивлений на выходе из канала, равных 5 и 10, безразмерный параметр изменения состояния потока сверхкритического теплоносителя в результате нагрева соответственно равен 2,58 и 2,50. Это качественно соответствует теоретическим представлениям о том, что, чем меньше коэффициент местного сопротивления на выходе из канала, тем данный безразмерный параметр выше.

Зависимость массового расхода от времени в процессе нагрева продемонстрировала резкий крен в сторону нуля, что, по-видимому, вызвано эффектом избыточного давления (что по природе аналогично неустойчивости Ледингга, о чем сказано в работе [13]).

Несмотря на приемлемые результаты тестирования на неколебательных переходных процессах, необходимо продолжать тестирование с захватом более широкого диапазона параметров недогрева до псевдокритической точки.

Благодарности. Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Список источников

1. Махин В.М. Концептуальные предложения по водоохлаждаемому реактору со сверхкритическими параметрами (обзор зарубежных и российских разработок SCWR) / В.М. Махин, А.Н. Чуркин // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов, 2017. – № 1. – С. 48-65.
2. Ambrosini W. Assessment of flow stability boundaries in a heated channel with different fluids at supercritical pressure. *Annals of nuclear energy*, 2011, vol. 38, no. 2-3, pp. 615-627.
3. Shitsi E. et al. Flow instability in parallel channels with water at supercritical pressure: a review. *World journal of engineering and technology*, 2017, vol. 6, no. 1, pp. 128-160, DOI:10.4236/wjet.2018.61008.
4. Суджян А.М. Анализ расчетных исследований теплогидравлической и нейтронно-теплогидравлической устойчивости реакторов с водой сверхкритического давления / А.М. Суджян, В.И. Деев, В.С. Харитонов, // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика, 2021. – № 3. – С. 29-43.
5. Pioro I., Mokry S. Thermophysical properties at critical and supercritical conditions. *Heat transfer-theoretical analysis, experimental investigations and industrial systems*, 2011, no. 22, DOI:10.5772/13790.
6. Ядерные реакторы с водой сверхкритического давления (основы теплового расчета): учебное пособие / В. И. Деев, А. Б. Круглов и др. – М.: НИЯУ МИФИ, 2015. – 156 с.
7. SEUIF97, available at: <https://github.com/thermologic/SEUIF97>, (accessed:03/21/2024).
8. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Рипол Классик, 2013. – 456 с.
9. Patankar S.V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Boca Raton, CRC Press, 2018, 241 p., DOI:10.1201/9781482234213.

10. Куштанова Г.Г. Математическое моделирование геофизических процессов: учебное пособие / Г.Г. Куштанова. – Казань, 2015. – 20 с.
11. Ambrosini W. Specifications for a benchmark exercise on flow stability in heated channels with supercritical fluids for the IAEA coordinated research programme on heat transfer behaviour and thermo-hydraulics codes testing for SCWRs. University of Pisa, Italy, DIMNP RL 1214(2009) Rev. 2, Pisa, November 14th, 2009.
12. Heat transfer behaviour and thermohydraulics code testing for supercritical water cooled reactors (SCWRs). Vienna (Austria): International atomic energy agency; 2014, 508 p.
13. Leung K.H. et al. Modelling of flow instabilities under supercritical conditions. Proc. 5th Int. Sym. SCWR (ISSCWR-5). Vancouver, British Columbia, Canada, March 13–16, 2011, 15 p.

Суджян Артавазд Манукович. Научный сотрудник НИЦ КИ. AuthorID: 1133311, SPIN: 2947-4122, ORCID: 0000-0001-6943-9220, artavazd1994@gmail.com, 123098, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1.

Берберова Мария Александровна. Кандидат технических наук. Доцент кафедры промышленной информатики РТУ МИРЭА. Основные направления исследований: Анализ надежности, вероятностный анализ безопасности, оценка рисков. AuthorID: 878433, SPIN: 7288-2530, ORCID: 0000-0002-6357-7929, maria.berberova@gmail.com. 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78.

Железняков Родион Алексеевич. Бакалавр. Студент кафедры промышленной информатики РТУ МИРЭА. ORCID: 0009-0005-2536-3208, ro517zh@gmail.com. 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78.

Хачатрян Артур Алексеевич. Бакалавр. Студент кафедры промышленной информатики РТУ МИРЭА. ORCID: 0009-0002-4489-2365, artur251373@gmail.com. 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78.

Лазарев Алексей Юрьевич. Бакалавр. Студент кафедры промышленной информатики РТУ МИРЭА. ORCID: 0009-0000-6610-5866, lexa03168@gmail.com. 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78.

Магомедов Раджаб Ибрагимович. Бакалавр. Студент кафедры промышленной информатики РТУ МИРЭА. ORCID: 0009-0002-9636-0942, radzhab._magomedov@icloud.com. 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78.

Юдин Владимир Михайлович. Бакалавр. Студент кафедры промышленной информатики РТУ МИРЭА. ORCID: 0009-0005-2764-4169, yudin_v_m@mail.ru. 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78.

UDC 621.039.51

DOI:10.25729/ESI.2025.39.3.009

One-dimensional thermal-hydraulic model in a channel with water at supercritical parameters

Artavazd M. Sujyan¹, Maria A. Berberova², Rodion A. Zheleznyakov², Artur A. Khachatryan², Aleksei Yu. Lazarev², Radzhab I. Magomedov², Vladimir M. Yudin²

¹Kurchatov institute, Russia, Moscow, artavazd1994@gmail.com

²MIREA – Russian Technological University, Russia, Moscow

Abstract. The paper presents a methodology used to create a one-dimensional model of thermal-hydraulics in a single heated channel with supercritical water. This model can be used to solve the problem of determining the boundaries of thermal-hydraulic stability. The technique is based on the principles laid down in the semi-implicit SIMPLE algorithm. The model includes equations of mass, momentum and energy conservation, taking into account the compressibility of the fluid. The model is implemented using in-house C++ program code. The IAPWS-IF97 library, implemented in the high-speed seuf97 package, was used to determine thermophysical properties of water. There are several correlations in the program to calculate the coefficient of hydraulic resistance, but the Blasius formula is selected for testing the model. The presented methodology involves solution of the basic thermal hydraulics equations with checking the continuity of the flow four times per one time step. The continuity cycle ends when a mass imbalance of 10⁻⁶ is reached, or when 10 iterations are reached. The results of testing the model are demonstrated.

Keywords: thermal-hydraulic model, supercritical parameters, heated channel, SIMPLE algorithm, compressibility of fluid, thermal-hydraulic stability

Acknowledgements. The work was carried out within the state assignment of NRC "Kurchatov institute".

References

1. Makhin V.M., Churkin A.N. Kontseptual'nyye predlozheniya po vodookhlazhdayemomu reaktoru so sverkhkriticheskimi parametrami (obzor zarubezhnykh i rossiyskikh razrabotok SCWR) [Conceptual Proposals for a Supercritical Water-Cooled Reactor (Review of Foreign and Russian SCWR Developments)]. Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov [Problems of Atomic Science and Technology. Series: Physics of Nuclear Reactors], 2017, no. 1, pp. 48-65.
2. Ambrosini W. Assessment of flow stability boundaries in a heated channel with different fluids at supercritical pressure. *Annals of nuclear energy*, 2011, vol. 38, no. 2-3, pp. 615-627.
3. Shitsi E. et al. Flow instability in parallel channels with water at supercritical pressure: a review. *World journal of engineering and technology*, 2017, vol. 6, no. 1, pp. 128-160, DOI:10.4236/wjet.2018.61008.
4. Sudzhan A.M., Deev V.I., Kharitonov V.S. Analiz raschetnykh issledovaniy teplogidravlicheskoj i neytronno-teplogidravlicheskoj ustoychivosti reaktorov s vodoy sverkhkriticheskogo davleniya [Analysis of Calculated Studies of Thermal-Hydraulic and Neutron-Thermal-Hydraulic Stability of Supercritical Pressure Water Reactors]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Nuclear Power Engineering], 2021, no. 3, pp. 29-43.
5. Pioro I., Mokry S. Thermophysical properties at critical and supercritical conditions. *Heat transfer-theoretical analysis, experimental investigations and industrial systems*, 2011, no. 22, DOI:10.5772/13790.
6. Deev V.I., Kruglov A.B., et al. Yadernye reaktory s vodoy sverkhkriticheskogo davleniya (osnovy teplovogo rascheta) [Nuclear Reactors with Supercritical Pressure Water (Fundamentals of Thermal Calculation)]: uchebnoye posobiye. Moscow, NRNU MEPhI Publ., 2015, 156 p.
7. SEUIF97, available at: <https://github.com/thermalogic/SEUIF97>, (accessed:03/21/2024).
8. Idel'chik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Handbook of Hydraulic Resistance]. Moscow, Ripol Klassik Publ., 2013, 456 p.
9. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. Boca Raton, CRC Press, 2018, 241 p., DOI:10.1201/9781482234213.
10. Kushtanova G.G. Matematicheskoye modelirovaniye geofizicheskikh protsessov [Mathematical Modeling of Geophysical Processes]. Kazan, 2015, 20 p.
11. Ambrosini W. Specifications for a benchmark exercise on flow stability in heated channels with supercritical fluids for the IAEA coordinated research programme on heat transfer behaviour and thermo-hydraulics codes testing for SCWRs. University of Pisa, Italy, DIMNP RL 1214(2009) Rev. 2, Pisa, November 14th, 2009.
12. Heat transfer behaviour and thermohydraulics code testing for supercritical water cooled reactors (SCWRs). Vienna (Austria): International atomic energy agency; 2014, 508 p.
13. Leung K.H. et al. Modelling of flow instabilities under supercritical conditions. Proc. 5th Int. Sym. SCWR (ISSCWR-5). Vancouver, British Columbia, Canada, March 13–16, 2011, 15 p.

Sujyan Artavazd Manukovich. Researcher at SRC KI. AuthorID: 1133311, SPIN: 2947-4122, ORCID: 0000 0001-6943-9220, artavazd1994@gmail.com, 123098, Moscow, square. Academician Kurchatov, 1.

Berberova Maria Aleksandrovna. Candidate of technical sciences. Associate professor of the industrial informatics department of RTU MIREA. Main research areas: Reliability analysis, probabilistic safety analysis, risk assessment. AuthorID: 878433, SPIN: 7288-2530, ORCID: 0000-0002-6357-7929, maria.berberova@gmail.com. 119454, Moscow, Vernadsky Avenue, 78.

Zheleznyakov Rodion Alekseevich. Bachelor. Student of the industrial informatics department of RTU MIREA. ORCID: 0009-0005-2536-3208, ro517zh@gmail.com. 119454, Moscow, Vernadsky Avenue, 78.

Khachatryan Artur Alekseevich. Bachelor. Student of the industrial informatics department of RTU MIREA. ORCID: 0009-0002-4489-2365, artur251373@gmail.com. 119454, Moscow, Vernadsky Avenue, 78.

Lazarev Aleksei Yurievich. Bachelor. Student of the industrial informatics department of RTU MIREA. ORCID: 0009-0000-6610-5866, lexa03168@gmail.com. 119454, Moscow, Vernadsky Avenue, 78.

Magomedov Radzhab Ibragimovich. Bachelor. Student of the industrial informatics department of RTU MIREA. ORCID: 0009-0002-9636-0942, radzhab._magomedov@icloud.com. 119454, Moscow, Vernadsky Avenue, 78.

Yudin Vladimir Mikhailovich. Bachelor. Student of the industrial informatics department of RTU MIREA. ORCID: 0009-0005-2764-4169, yudin_v_m@mail.ru. 119454. Moscow, Vernadsky Avenue, 78.

Статья поступила в редакцию 23.02.2025; одобрена после рецензирования 27.06.2025; принята к публикации 18.08.2025.

The article was submitted 02/23/2025; approved after reviewing 06/27/2025; accepted for publication 08/18/2025.