

Технические аспекты применения модели пористого тела Дарси для предварительной оценки схемных решений в АЭС

С.В. Яуров¹, В.П. Поваров¹, И.А. Чусов²

¹ Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»,
396072 Россия, Воронежская обл., г. Нововоронеж, Промышленная зона Южная, 1

² ИАТЭ НИЯУ МИФИ
249039 Россия, Калужская обл, г. Обнинск, Студгородок, 1

Реферат. Предложен подход к моделированию режимов работы технологических систем и оборудования АЭС, основанный на представлении элементов сложной геометрии (оборудования) в виде сплошной пористой среды. Подход основан на применении модели пористого тела Дарси. Гидравлическое сопротивление таких элементов задается эквивалентными параметрами. Для реализации подхода разработан специализированный алгоритм. Представлены некоторые результаты апробации данного подхода на примере моделирования режимов работы регенеративного теплообменного аппарата системы продувки и дренажей парогенератора, а также системы подпитки градирен энергоблоков № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2.

Ключевые слова: АЭС-2006, модель пористого тела, подпитка градирен, продувка парогенератора, алгоритм, численное моделирование, регенеративный теплообменник.

Для цитирования: Яуров С.В., Поваров В.П., Чусов И.А. Технические аспекты применения модели пористого тела Дарси для предварительной оценки схемных решений в АЭС. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2026;1:71–86. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.1.06>

Введение

Наиболее достоверным способом верификации теплогидравлических характеристик оборудования в составе сложных систем является экспериментальное моделирование на стендах. Данный подход достаточно часто применяется для вновь разрабатываемых систем (оборудования), однако он является достаточно ресурсозатратным.

Альтернативу эмпирическим и полуэмпирическим методикам представляет CFD-моделирование (Computational Fluid Dynamics), основанное на принципах механики

сплошных сред. Данный подход предполагает прямое численное решение систем уравнений Навье – Стокса или Рейнольдса.

Выбор подхода к моделированию определяется конечной целью исследования. Для изучения локальных процессов, таких как температурное расслоение, сталкивающиеся струи, образование вихрей, противоточные течения, требуется построение детальной трехмерной модели. В случаях, когда необходим прогноз рабочих параметров системы (оборудования) в целом, применяются подходы с упрощенной расчетной областью. Подобные упрощения, принимаемые на этапе построения модели, позволяют значительно сократить вычислительные затраты за счет уменьшения числа элементов расчетной сетки.

В качестве одного из методов упрощения предлагается замена элементов со сложной геометрией эквивалентной пористой средой. Данный подход позволяет аппроксимировать группу таких элементов сплошным пористым телом (телами) с эквивалентным гидравлическим сопротивлением, а для решения задачи используется математическая модель пористого тела Дарси.

Для реализации этого подхода при расчетно-экспериментальном анализе режимов работы технологических систем (оборудования) авторами разработаны соответствующие алгоритмы, включающие в себя процедуры применения модели Дарси и определения ее ключевых характеристик. Проведенная апробация продемонстрировала высокую точность предлагаемого подхода.

Выбор модели пористого тела

Модель пористого тела позволяет выполнять теплогидравлический расчет систем (оборудования) со сложными элементами, имитируя их гидравлическое сопротивление.

Наиболее популярные модели пористого тела [1]:

- Дарси;
- Бринкмана;
- Дарси – Форхгеймера.

Модель Дарси описывает течение жидкости через поровое пространство полностью насыщенной пористой среды, обусловленное действием градиента давления при условии, что перенос импульса вследствие действия касательных напряжений в жидкости пренебрежимо мал.

Модель Дарси определяет линейную зависимость между градиентом давления и скоростью фильтрации.

Для описания течений в высокопроницаемых (проницаемость более $0,1D$) и высокопористых (пористость более $0,5$) средах применяются расширенные версии модели Дарси. Наиболее известной из них является модель Бринкмана, уравнения которой учитывают инерционные эффекты, градиент давления и гравитационную силу, что делает ее применимой для быстрых течений [2].

Для сред с экстремально высокой пористостью (пористость более $0,9$) и проницаемостью (проницаемость более $10D$) используется дальнейшее развитие – модель Дарси – Форхгеймера. Она включает в себя как квадратичную по скорости силу сопротивления (закон Форхгеймера), так и инерционные слагаемые из уравнений Навье – Стокса. Необходимость в таких сложных моделях возникает при модели-

ровании неизотермических течений в условиях высокой теплопроводности [3, 4], а также при анализе быстропротекающих процессов [1].

Модель Дарси имеет ограничения по применению, определяемые в первую очередь скоростью течения среды [5 – 7]. Учитывая, что, в основном, в оборудовании и технологических системах АЭС скорость среды не превышает 0,7 – 7,5 м/с [8 – 10], модель Дарси применима для прогнозирования параметров (режимов) работы оборудования технологических систем АЭС.

Модель сохраняет условия диффузии и поэтому может быть использована для моделирования течений в пучках стержней или труб.

Закон Дарси имеет вид

$$\varphi \bar{V}_p = -\frac{K}{\nu} \left(\frac{1}{\rho} \nabla P_p - g \bar{\gamma} \right), \quad (1)$$

где \bar{V}_p – скорость движения жидкости в порах; P_p – давление; φ и K – пористость и проницаемость среды соответственно; ρ и ν – плотность и кинематическая вязкость; $\bar{g} = -g \bar{\gamma}$ – ускорение силы тяжести; $\bar{\gamma}$ – единичный вектор, направленный вертикально вверх. Индекс «р» обозначает величины, относящиеся к пористой среде.

Законы гидравлического сопротивления для модели пористого тела Дарси записываются в виде приведенного коэффициента сопротивления.

Общее выражение для расчета потери давления на трение согласно [11, 12]:

$$\frac{\Delta P}{\Delta l} = CR \cdot U^2, \quad (2)$$

где CR – приведенный коэффициент гидравлического сопротивления, кг/м⁴; ΔP – изменение давления, Па; Δl – длина пути, м.

Выражение для расчета потери давления на трение имеет следующий вид:

$$\Delta P = \left(\xi_0 + \lambda \frac{\Delta l}{d_r} \right) \frac{\rho U^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{\varphi} \right)^2, \quad (3)$$

где ξ_0 – местные сопротивления; λ – коэффициент гидравлического сопротивления; d_r – гидравлический диаметр, м; ρ – плотность среды, кг/м³; Δl – длина пути, м; U – скорость среды, м/с; φ – степень пористости.

Степень пористости рассчитывается по следующему выражению:

$$\varphi = \frac{V_{ж}}{V_0}, \quad (4)$$

где φ – отношение объема среды ($V_{ж}$) в оборудовании к общему объему оборудования (V_0).

Коэффициенты гидравлического сопротивления (λ) рассчитываются исходя из специфических законов гидравлического сопротивления для каждого пористого тела с учетом особенностей конструкции оборудования.

Имеем систему уравнений (5), из которой выводится выражение (6) для определения приведенных коэффициентов гидравлического сопротивления трению, при этом для каждого пористого тела определяются приведенные коэффициенты гидравлического сопротивления для продольного и поперечного течения CR :

$$\begin{cases} \Delta P = \left(\xi_0 + \lambda \frac{\Delta l}{d_r} \right) \frac{\rho U^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{\phi} \right)^2 \\ \frac{\Delta P}{\Delta l} = CR \cdot U^2 \end{cases} \quad (5)$$

$$CR = \left(\frac{\xi_0}{\Delta l} + \frac{\lambda}{d_r} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{1}{\phi} \right)^2. \quad (6)$$

Методика применения модели пористого тела

Ранее авторы успешно апробировали модель пористого тела для моделирования течения жидкометаллического теплоносителя в баках реакторов на быстрых нейтронах [11, 12].

На рисунке 1 представлен предлагаемый авторами общий алгоритм применения данной модели в теплогидравлических расчетах. Его ключевые этапы включают в себя

- 1) выбор объекта моделирования – идентифицируется объект, содержащий элементы сложной конструкции, которые подлежат замене эквивалентной пористой средой;
- 2) формирование пористых тел – на основе типа течения (продольное, поперечное) определяется количество субмоделей; элементы со схожей геометрией и характеристиками группируются и заменяются расчетными областями простой формы (цилиндр, куб, сфера);

- 3) расчет коэффициентов гидравлического сопротивления – наиболее трудоемкий этап, требующий определения приведенных коэффициентов по выражению (6), для этого необходимы детальные геометрические данные заменяемых областей, параметры потока (расход, скорость, температура) и соответствующие эмпирические зависимости [13, 14];

- 4) валидацию расчетной модели – проводится теплогидравлический расчет с использованием коммерческих или открытых вычислительных кодов; критическим условием является наличие репрезентативных экспериментальных данных для сравнения; если результаты расчета признаются адекватными, осуществляется переход к следующему этапу;

- 5) прогнозирование режимов работы – на валидированной модели исследуются стационарные и нестационарные режимы работы системы или оборудования, по итогам чего формируется отчетная документация.

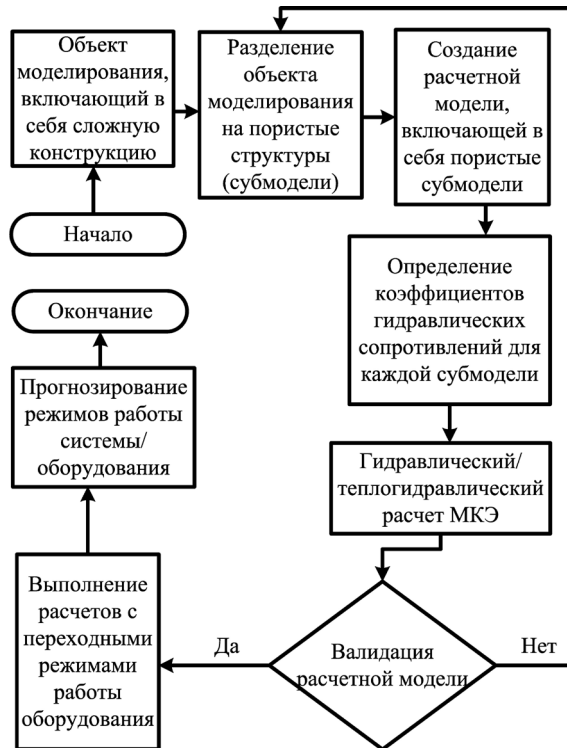


Рис. 1. Алгоритм применения модели пористого тела в гидравлических расчетах

Ключевые преимущества подхода:

- простота реализации – алгоритм не требует сложных вычислительных процедур;
- учет нелинейных эффектов – использование нелинейных коэффициентов сопротивления, зависящих от скорости потока, позволяет достоверно моделировать переходные режимы;
- сокращение вычислительных затрат – подход обеспечивает значительное уменьшение времени расчета по сравнению с моделированием полной геометрии.

Недостатки представленного подхода:

- требуются дополнительные исходные данные для определения основных характеристик пористого тела (степень пористости, гидравлическое сопротивление, направление течения среды);
- трудоемкий процесс определения приведенных коэффициентов гидравлического сопротивления.

С целью оптимизации и облегчения второго недостатка авторами разработан алгоритм по определению характеристик модели пористого тела (рис. 2).

Алгоритм определения характеристик модели пористого тела сводится к определению следующих параметров и зависимостей:

- расчет степени пористости на основе геометрических характеристик заменяемой конструкции; необходимые объемы могут быть легко получены с помощью современных САПР;
- классификация типа течения – определение преобладающего направления потока относительно конструкции (продольное или поперечное);

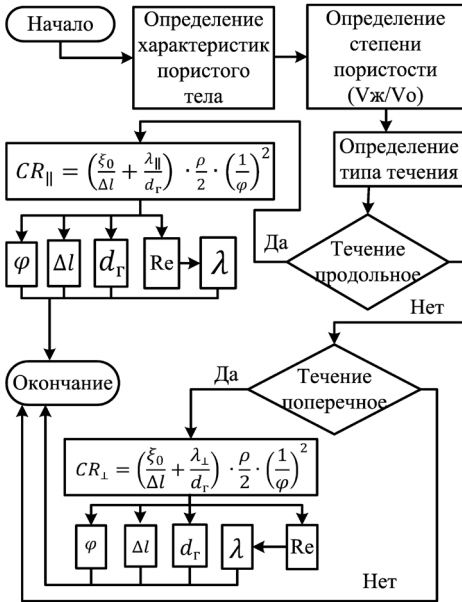


Рис. 2. Алгоритм определения характеристик модели пористого тела

- подбор эмпирических зависимостей для законов сопротивления; на данном этапе оцениваются гидравлический диаметр, степень пористости и коэффициенты гидравлического сопротивления заменяемой области;

- расчет приведенных коэффициентов сопротивления – определение коэффициентов продольного и поперечного сопротивления с учетом влияния местных гидравлических сопротивлений.

Корректное использование алгоритма требует от пользователя задания полного набора исходных данных, включающего в себя геометрические характеристики системы (диаметры, длины) и параметры рабочей среды (расход, температура, давление, состав и направление потока).

Постановка задачи

Регенеративный теплообменный аппарат системы продувки парогенераторов Нововоронежской АЭС-2

В качестве объекта численного моделирования с типовой геометрией выбран регенеративный теплообменный аппарат со спирально навитыми трубками (РТО). Данный теплообменник используется в системе продувки и дренажей парогенераторов на энергоблоках № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2.

В ходе испытаний системы в рамках пуско-наладочных работ выявлена низкая эффективность РТО [15].

Основные эксплуатационные характеристики теплообменника в номинальном режиме работы приведены в табл. 1, а общий вид представлен на рис. 3 [15].

Таблица 1

Основные характеристики РТО [15,17]

Параметр	Значение
Наружный диаметр теплообменных труб и их толщина, мм	15×1,5
Общее количество теплообменных труб, шт.	488
Площадь поверхности теплообмена (по наружному диаметру труб), м ²	310
Наружный диаметр, мм	1200×65
Общая высота теплообменника, мм	5373
Давление среды, МПа	6,9
Температура на входе в РТО охлаждаемой среды (трубное пространство), °С	285
Температура на выходе из РТО охлаждаемой среды (трубное пространство), °С	≤ 100
Расход среды, т/ч	140

Конструктивной особенностью РТО являются спирально навитые теплообменные трубки с переменным шагом и длиной навивки, зависящими от порядкового номера ряда. Создание точной трехмерной геометрии такой конфигурации представляет собой трудоемкую задачу.

В данной работе моделируется номинальный режим работы РТО в трубном пространстве (со стороны охлаждаемой среды) с использованием модели пористого тела и метода конечных элементов. Результаты расчета сравниваются с проектными (реальными) характеристиками.

При разработке модели принят следующий подход:

- построение полномасштабной трехмерной модели теплообменника, за исключением области размещения спиральных теплообменных трубок, эта область заменена полыми цилиндрами (рис. 4а);
- классификация спиральных трубок на семь групп и создание для каждой из них геометрической модели в виде полого цилиндра (рис. 4б); каждая группа рассма-

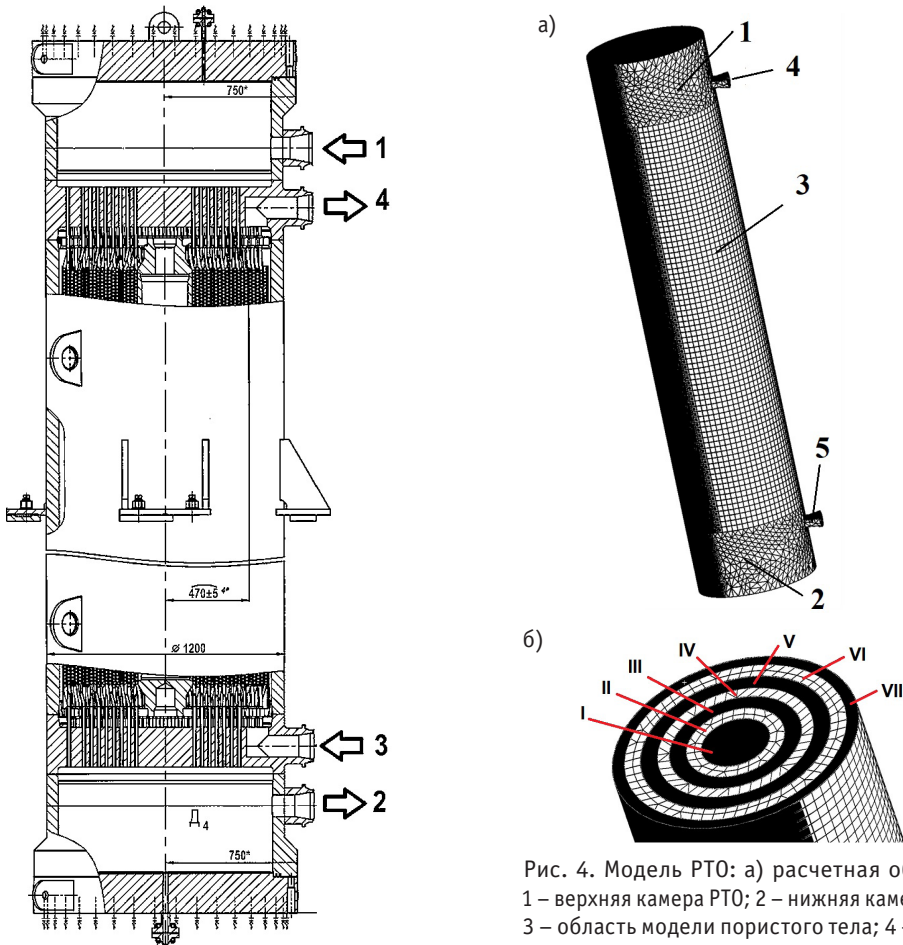


Рис. 3. Общий вид теплообменника (РТО)[15]: 1 – патрубок входа охлаждаемой среды; 2 – патрубок выхода охлаждаемой среды; 3 – патрубок входа охлаждающей среды; 4 – патрубок выхода охлаждающей среды

Рис. 4. Модель РТО: а) расчетная область: 1 – верхняя камера РТО; 2 – нижняя камера РТО; 3 – область модели пористого тела; 4 – патрубок входа охлаждаемой среды; 5 – патрубок выхода охлаждаемой среды; б) группы полых цилиндров: I – VII группа – заменителей спиральных теплообменных трубок в составе расчетной модели

тривается как отдельное пористое тело с собственной расчетной областью в рамках общей геометрии аппарата;

- определение для каждой группы степени пористости и приведенных коэффициентов гидравлического сопротивления в виде зависимостей согласно (4), (6) и [13, 14].

Система подпитки градирен энергоблоков № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2

Исходной геометрией для выполнения гидравлического расчета системы подпитки основной охлаждающей воды Нововоронежской АЭС-2 является тракт трубопроводов с оборудованием от береговой насосной станции из р. Дон до чаш градирен. Исходной геометрией (объектом) для применения модели пористого тела являются механические фильтры (фильтр предочистки, два одинаковых фильтра тонкой очистки) [16].

Технологическая схема трубопроводов подпитки градирен представлена на рис. 5, характеристики режима работы системы представлены в табл. 2, конструкция фильтров представлена на рис. 6, основные параметры фильтров приведены в табл. 3.

Как отмечено в работах [16 – 18], проектный режим эксплуатации системы на энергоблоках № 1 и 2 Нововоронежской АЭС-2 при одновременной работе двух насосов не позволяет достичь расходов подпитки, необходимых для минимизации карбонатных отложений на элементах градирен.

При моделировании работы фильтров в составе системы при помощи модели пористого тела выбран следующий подход:

- все фильтры механические заменялись фигурой-аналогом (в виде цилиндра);
- для каждого фильтра определялись степень пористости и приведенные коэффициенты гидравлического сопротивления в виде зависимостей согласно выражениям (4), (6) и [13, 14].

Выполнялось моделирование одного из проектных режимов работы системы (в работе два насоса), с последующим моделированием режимов с увеличенным количеством работающих насосов.

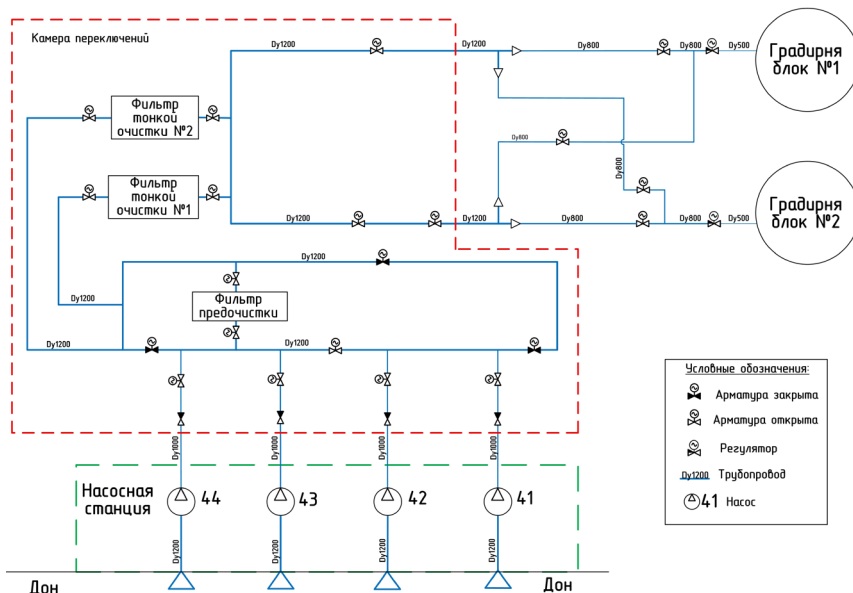


Рис. 5. Технологическая схема трубопроводов подпитки градирен [16, 17]

Таблица 2

Основные характеристики режима работы системы подпитки градирен [16, 17]

Параметр (эксперимент)	Значение
Давление	
на напоре насосов системы, МПа	0,62
перед фильтром предочистки, МПа	0,55
после фильтра предочистки, МПа	0,46
перед фильтром тонкой очистки № 1, МПа	0,41
после фильтра тонкой очистки № 1, МПа	0,4
перед фильтром тонкой очистки № 2, МПа	0,41
после фильтра тонкой очистки № 2, МПа	0,4
на градирню блока № 6, МПа	0,4
на градирню блока № 7, МПа	0,4
Общий расход на подпитку градирен, л/с	2613

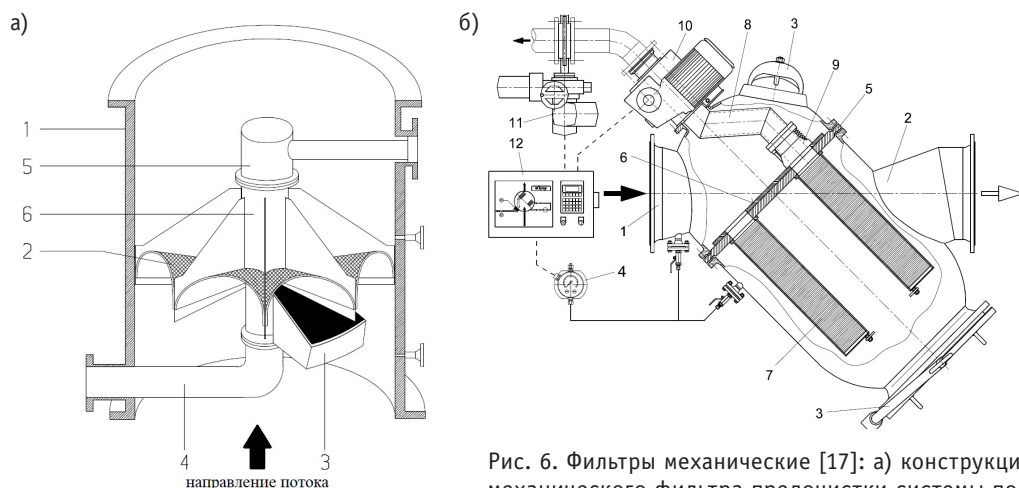


Рис. 6. Фильтры механические [17]: а) конструкция механического фильтра предочистки системы подпитки градирен: 1 – корпус фильтра; 2 – фильтрующая вставка; 3 – ротор обратной промывки; 4 – линия обратной промывки; 5 – привод ротора; 6 – подшипниковый узел; б) конструкция механического фильтра тонкой очистки системы подпитки градирен: 1 – впускная камера; 2 – выпускная камера; 3 – инспекционный люк; 4 – система измерения разности давлений; 5 – промежуточное дно; 6 – сегмент скольжения; 7 – фильтровальный патрон; 8 – ротор обратной промывки; 9 – промывочный наконечник; 10 – подшипниковый узел и привод; 11 – промывочная арматура с сервоприводом; 12 – система управления

Разработанная расчетная модель представлена на рис. 7. Модели-заменители фильтров выделены розовым цветом.

Основная цель численного моделирования работы системы подпитки основной охлаждающей воды – выполнить расчет номинального режима работы системы с использованием модели пористого тела (вместо фильтров) с последующим сравнением с проектными (реальными) характеристиками, с помощью расчетной модели предложить оптимальную конфигурацию для режима с увеличенным количеством постоянно работающих насосов.

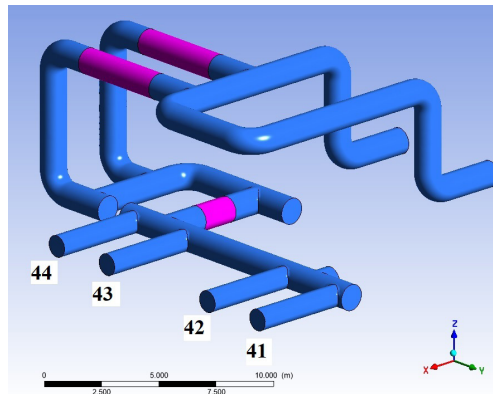


Рис. 7. 3D-модель трассировки трубопроводов системы подпитки градирен [16, 17]

Результаты

Регенеративный теплообменный аппарат

Результаты расчета режима работы регенеративного теплообменника и сравнение с реальными его характеристиками представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета режима работы РТО

Параметр	Расчетное значение	Проектное (экспериментальное) значение	Δ , %
Давление среды, МПа	6,891	6,9	0,12
Температура на входе в РТО охлаждаемой среды (трубное пространство), °С	285	285	*
Температура на выходе из РТО охлаждаемой среды из ПГ (трубное пространство), °С	96,2	≤ 100	4
Расход среды, т/ч	140	140	*

* параметр использовался в качестве граничных условий в расчетной модели

Сравнительный анализ полученных расчетных и реальных характеристик регенеративного теплообменника показал, что разработанная расчетная модель в полном объеме описывает течение теплоносителя в трубном пространстве, а коэффициенты гидравлического сопротивления выбраны правильно.

На основании спрогнозированных расчетных режимов работы системы (с применением предложенного подхода на основе пористого тела Дарси) проведена модернизация трассировки трубопроводов обвязки теплообменного аппарата в части изменения подачи охлаждающей среды (снизу вверх) и охлаждаемой среды (сверху вниз) для энергоблоков № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2 (изначальная проектная схема обвязки: подача охлаждающей среды – сверху вниз; подача охлаждаемой среды – снизу вверх) [15].

Система подпитки градирен энергоблоков №1, 2 Нововоронежской АЭС-2

Результаты расчета номинального режима работы системы подпитки градирен и сравнение с реальными (экспериментальными) параметрами в системе представлены в табл. 4.

Таблица 4

Обобщенные результаты расчетов [16, 17]

Параметр	Эксперимент	Расчет	$\Delta\%$	Эксперимент	Расчет	$\Delta\%$
Количество насосов в работе	2 (№ 44, № 42)			3 (№ 41, № 42, № 44)		
Давление						
на напоре насосов системы, МПа	0,62	0,61	1,61	0,7	0,69	1,42
перед фильтром предочистки, МПа	0,55	0,608	9,53	0,612	0,6787	9,83
после фильтра предочистки, МПа	0,46	0,457	0,14	0,512	0,4998	2,44
перед фильтром тонкой очистки № 1, МПа	0,41	0,45	8,89	0,53	0,4903	8,10
после фильтра тонкой очистки № 1, МПа	0,4	0,405	1,23	0,406	0,3923	3,49
перед фильтром тонкой очистки № 2, МПа	0,41	0,45	0,89	0,53	0,4907	8,01
после фильтра тонкой очистки № 2, МПа	0,40	0,406	1,48	0,407	0,3916	3,93
на градирню блока № 6, МПа	0,4	0,404	0,99	0,395	0,3875	1,94
на градирню блока № 7, МПа	0,4	0,405	1,23	0,378	0,3898	3,03
Общий расход на подпитку градирен*, л/с	2613*	2613*	*	3800*	3800*	*

* параметр использовался в качестве граничных условий в расчетной модели

Выявлена приемлемая сходимость расчетных и экспериментальных значений теплотехнических параметров системы для проектного режима работы (режим в работе двух насосов из четырех). С помощью предложенного подхода с применением модели пористого тела Дарси была выполнена серия расчетов для различного количества постоянно работающих насосов.

По результатам спрогнозированных расчетных режимов проведены испытания системы подпитки градирен энергоблоков № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2 (Проект РУ В-392М, ВВЭР-1200) в режиме трех постоянно работающих насосов (см. табл. 4). Данный режим принят в качестве базового режима работы.

Заключение

1. Авторами разработан и апробирован подход к теплогидравлическому моделированию с заменой элементов сложной геометрии пористой средой. В рамках исследования была использована модель Дарси, что обусловлено ее применимостью в диапазоне пористости моделируемого оборудования (0,1 – 0,8) и предельно допустимыми скоростями теплоносителя в оборудовании и технологических системах АЭС (0,7 – 7,5 м/с).

2. Проведена валидация подхода на двух типах оборудования: регенеративном теплообменнике и механическом фильтре. Для каждого объекта определены приведенные коэффициенты гидравлического сопротивления в виде зависимостей на основе релевантных эмпирических зависимостей [13, 14].

3. Верификационные расчеты показали

- высокую точность расчетов с применением предложенного подхода: отклонения результатов от проектных (реальных) данных составили от 0,1 до 10% для различного вида оборудования;
- влияние дискретизации: повышение точности расчетов достигается за счет разбиения объекта на несколько пористых тел с уникальными законами сопротивления для каждого;
- трудоемкость определения характеристик пористого тела: основная сложность заключается в определении степени пористости и специфических законов сопротивления для каждой субмодели. С целью снижения этих трудозатрат, авторами разработан алгоритм по определению характеристик модели пористого тела.

4. Определены область применения и ограничения подхода:

- подход наиболее эффективен для прогнозирования интегральных параметров системы, когда детальное моделирование внутренних локальных процессов не является приоритетом;
- метод оправдан в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, так как позволяет существенно сократить время расчетов;
- главным ограничением является трудоемкость процедуры параметризации модели, требующая определения пористости и подбора эмпирических зависимостей для определения приведенных коэффициентов гидравлического сопротивления.

5. Выполнение расчетов с применением модели пористого тела позволило сократить затрачиваемое время для подготовки и проведения расчетов по сравнению с подходами, использующими детальные трехмерные модели для аналогичных трактов (элементов), в среднем в 2–3 раза (зависит от геометрической сложности объекта моделирования и поставленной задачи):

- при расчете регенеративного теплообменника со спирально-навитыми трубками с прямым построением геометрии общее затраченное время составило около 88 часов (подготовка геометрии – 48 часов, теплогидравлический расчет – 40 часов); с применением модели пористого тела 24 часа (подбор коэффициентов гидравлического сопротивления – 10 часов, построение геометрии – 4 часа, расчет – 10 часов).
- при расчете тракта трубопроводов с оборудованием (с механическими фильтрами очистки) с прямым построением геометрии общее затраченное время составило 100 часов (подготовка геометрии – 70 часов, теплогидравлический расчет – 30 часов); с применением модели пористого тела – 25 часов (подбор коэффициентов гидравлического сопротивления – 7 часов, построение геометрии – 4 часа, расчет – 14 часов).

Литература

1. Nield D.A., Bejan A. Convection in porous media. Springer International Publishing AG, 2017, 778 p. ISBN 978-3-319-84189-2.
2. Brinkman H.C. A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles. *Applied Scientific Research*. 1947;1:27–34.
3. Straughan B. A sharp nonlinear stability threshold in rotating porous convection. *Proceedings of the Royal Society of London A*. 2001;457:87–93. DOI: https://doi.org/10.1098/rspa.2000.0657?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
4. Vadasz P. Coriolis effect on gravity-driven convection in a rotating porous layer heated from below. *Journal of Fluid Mechanics*. 1998;376:351–375. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11242-013-0152-z>

5. Скрылева Е.И., Никитин В.Ф., Логвинов О.А., Смирнов Н.Н. Фильтрационные течения в пористых средах. Учебное пособие. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2017, 72 с.
6. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации: Учебное пособие. 2-е издание. М.: Изд-во Центра прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2009, 88 с. ISBN 978-5-317-05628-5.
7. Коленкина Е.И., Никитин В.Ф., Логвинов О.А., Смирнов Н.Н. Фильтрационные течения в пористых средах. Учебное пособие. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2017, 73 с. ISBN 978-5-93838-077-6.
8. ГОСТ 31901-2013 Арматура трубопроводная для атомных станций. Общие технические условия. Москва, Стандартинформ, 2018, 48 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104765> (дата обращения 01.02.2026).
9. СП 30.13330.2020. Свод правил. Внутренний водопровод и канализация зданий. СНиП 2.04.01-85* (утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 30.12.2020 N 920/пр), 2021, 96 с. URL: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/pravila/0/sp_30_13330_2020_svod_pravil_vnutrennij_vodoprovod_i.html (дата обращения 01.02.2026).
10. НП-068-05. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2005, 87 с. URL: https://docs.secnrs.ru/documents/nps/%D0%9D%D0%9F-068-05/%D0%9D%D0%9F-068-2005/NP06805r_1.html (дата обращения 01.02.2026).
11. Лескин С.Т., Слободчук В.И., Шелегов А.С., Яуров С.В., Чистозвонова Е.А., Сорокин А.П., Опанасенко А.Н., Калякин С.Г., Зарюгин Д.Г. Численное моделирование неизотермического течения теплоносителя в баке быстрого реактора. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2013;4:78–85. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2013.4.10>
12. Яуров С.В., Лескин С.Т., Шелегов А.С., Слободчук В.И., Чусов И.А., Швецов Ю.Е. Расчетное моделирование стратификации теплоносителя в баке быстрого реактора. Сб. докл. научно-технической конф. «Теплофизика-2012». Обнинск, ГНЦ РФ – ФЭИ, 2013, с. 216 – 227.
13. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992, 672 с.
14. Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. М.: ИздАт, 2010, 776 с. ISBN 978-5-86656-245-9.
15. Яуров С.В., Боровой А.В., Юдин А.В., Болгов М.В., Данилов А.Д. Расчетно-экспериментальное обоснование повышения эффективности регенеративного теплообменника системы продувки парогенераторов проекта АЭС-2006 (РУ В-392М). *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2022;2:27–36. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2022.2.03>
16. Яуров С.В., Данилов А.Д., Гусев К.Ю., Гусев И.Н. Математическое моделирование сложных технологических систем методом конечных элементов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(3). DOI: <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.42.3.024>
17. Яуров, С.В., Данилов А.Д., Гусев К.Ю. Конечно-элементное моделирование теплогидравлических процессов методом пористого тела. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(1). DOI: <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.44.1.006>
18. Поваров В.П., Стацуря Д.Б., Усачев Д.Е. Опыт эксплуатации и пути повышения эффективности работы системы технического водоснабжения энергоблоков № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2020;2:5–16. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2020.2.01>

Поступила в редакцию 26.12.2025
После доработки 19.03.2026
Принята к опубликованию 20.03.2026

Авторы

Яуров Сергей Васильевич, главный технолог,

E-mail: YaurovSV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Поваров Владимир Петрович, заместитель Генерального директора – директор Нововоронежской АЭС, д.т.н.,

E-mail: PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Чусов Игорь Александрович, профессор, д.т.н.,

E-mail: igrch@mail.ru

UDC 621.039

Technical Aspects of the Application of the Darcy Porous Body Model for the Preliminary Evaluation of Circuit Solutions in Nuclear Power Plants

Yaurov S.V.¹, Povarov V.P.¹, Chusov I.A.²

¹ Branch of JSC Rosenergoatom Concern, Novovoronezh Nuclear Power Plant,
1 Industrial zone Yuzhnaya, 396072 Novovoronezh, Voronezh reg., Russia

² OINPE MEFhI,

1 Studgorodok, 249039 Obninsk, Kaluga reg., Russia

Abstract

An approach to modeling the operating modes of technological systems and equipment of nuclear power plants is proposed, based on the representation of elements of complex geometry/equipment in the form of a continuous porous medium. The approach is based on the application of the Darcy porous body model. The hydraulic resistance of such elements is set by equivalent parameters. A specialized algorithm has been developed to implement the approach. Some results of testing this approach are presented using the example of modeling the operating modes of a regenerative heat exchanger of a steam generator purge and drainage system, as well as a cooling tower recharge system for power units No. 1, 2 of Novovoronezh NPP-2.

Keywords: NPP-2006, porous body model, cooling tower recharge, steam generator purge, algorithm, numerical modeling, regenerative heat exchanger.

For citation: Yaurov S.V., Povarov V.P., Chusov I.A. Technical Aspects of the Application of the Darcy Porous Body Model for the Preliminary Evaluation of Circuit Solutions in Nuclear Power Plants. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2026;1:71–86. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.1.06> (in Russian).

References

1. Nield D.A., Bejan A. Convection in porous media. Springer International Publishing AG, 2017, 778 p. ISBN 978-3-319-84189-2.
2. Brinkman H.C. A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles. *Applied Scientific Research*. 1947;1:27–34.
3. Straughan B. A sharp nonlinear stability threshold in rotating porous convection. *Proceedings of the Royal Society of London A*. 2001;457:87–93. DOI: https://doi.org/10.1098/rspa.2000.0657?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

4. Vadasz P. Coriolis effect on gravity-driven convection in a rotating porous layer heated from below. *Journal of Fluid Mechanics*. 1998;376:351–375. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11242-013-0152-z>
5. Skryleva E.I., Nikitin V.F., Logvinov O.A., Smirnov N.N. Filtration flows in porous media. Moscow, Lomonosov Moscow State University Publ., 2017, 72 p. (in Russian).
6. Leontiev N.E. Fundamentals of filtration theory: A textbook. 2nd edition. Moscow, Publishing House of the Center for Applied Research at the Faculty of Mechanics and Mathematics of Moscow State University, 2009, 88 p. ISBN 978-5-317-05628-5 (in Russian).
7. Kolenkina E.I., Nikitin V.F., Logvinov O.A., Smirnov N.N. Filtration flows in porous media. Study guide. Moscow, Lomonosov Moscow State University Publ., 2017, 73 p. ISBN 978-5-93838-077-6 (in Russian).
8. GOST 31901-2013 Pipeline fittings for nuclear power plants. General technical conditions. Moscow, Standartinform Publ., 2018, 48 c. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104765> (accessed Feb. 01, 2026) (in Russian).
9. SP 30.13330.2020 Set of rules. Internal water supply and sewerage of buildings. Moscow, Standartinform Publ., 2021, 96 p. URL: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/pravila/0/sp_30_13330_2020_svod_pravil_vnutrenniy_vodoprovod_i.html (accessed Feb. 01, 2026) (in Russian).
10. NP-068-05. Federal norms and rules in the field of atomic energy use. Pipeline fittings for nuclear power plants. General technical requirements. Moscow, Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service Publ., 2005, 87 p. URL: https://docs.secnrs.ru/documents/nps/%D0%9D%D0%9F-068-05/%D0%9D%D0%9F-068-2005/NP06805r_1.html (accessed Feb. 01, 2026) (in Russian).
11. Leskin S.T., Slobodchuk V.I., Shelegov A.S., Yaurov S.V., Chistozvonova E.A., Sorokin A.P., Opanasenko A.N., Kalyakin S.G., Zaryugin D.G. Numerical simulation of the coolant flow in the porous body model of a fast breeder reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2013;4:78–85. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2013.4.10> (in Russian).
12. Yaurov S.V., Leskin S.T., Shelegov A.S., Slobodchuk V.I., Chusov I.A., Shvetsov Yu.E. Computational modeling of coolant stratification in a fast reactor tank. Collection of reports of the scientific and technical conference “Thermal Physics-2012”. Obninsk, IPPE JSC, 2013, p. 216–227 (in Russian).
13. Idelchik I.E. Handbook of hydraulic resistance. 3rd ed., revised and add. Moscow, Mechanical Engineering, 1992, 672 p. (in Russian).
14. Kirillov P.L., Bobkov V.P., Zhukov A.V., Yuryev Yu.S. Handbook of thermohydraulic calculations in nuclear power engineering. Moscow, IzdAt, 2010, 776 p. ISBN 978-5-86656-245-9 (in Russian).
15. Yaurov S.V., Borovoy A.V., Yudin A.V., Bolgov M.V., Danilov A.D. Computational and experimental justification of increasing the efficiency of the regenerative heat exchanger of the steam generator purge system of the NPP-2006 project (RU V-392M). *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2022;2:27–36. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2022.2.03> (in Russian).
16. Yaurov S.V., Danilov A.D., Gusev K.Yu., Gusev I.N. Mathematical modeling of complex technological systems by the finite element method. *Modeling, optimization and information technologies*. 2023;11(3). DOI: <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.42.3.024> (in Russian).
17. Yaurov S.V., Danilov A.D., Gusev K.Yu. Finite element modeling of thermohydraulic processes by the porous body method. *Modeling, optimization and information technologies*. 2024;12(1). DOI: <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.44.1.006> (in Russian).
18. Povarov V.P., Statsura D.B., Usachev D.E. Operational experience and ways to improve the efficiency of the technical water supply system of power units No. 1, 2 of Novovoronezh NPP-2. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2020;2:5–16. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2020.2.01> (in Russian).

Authors

Sergey V. Yaurov, Chief Technologist,

E-mail: YaurovSV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Vladimir P. Povarov, Deputy Director General – Director of the Novovoronezh NPP,
Dr. Sci. (Engineering),

E-mail: PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Igor A. Chusov, Professor, Dr. Sci. (Engineering),

E-mail: igrch@mail.ru