

УДК 51-74

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.44.1.006](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.44.1.006)

## Конечно-элементное моделирование теплогидравлических процессов методом пористого тела

С.В. Яуров✉, А.Д. Данилов, К.Ю. Гусев

*Воронежский государственный технический университет, Воронеж,  
Российская Федерация*

**Резюме.** В работе рассмотрены наиболее известные модели пористого тела, используемые для упрощения выполнения теплогидравлических расчетов методом конечных элементов. Показаны основные подходы и зависимости при использовании модели пористого тела в расчетах. Представлены результаты теплогидравлических расчетов с применением модели пористого тела Дарси. Выполнен расчет теплообменного аппарата со спирально навитыми трубками, выполнен расчет сложной технологической системы, имеющей в своем составе механические фильтры разной конфигурации. Определены расхождения расчетных и реальных параметров оборудования. Применение модели пористого тела в качестве гидравлического аналога оборудования на примере механических фильтров и теплообменника показало приемлемые результаты (отклонения от проектных величин составляет от 0,1 % до 10 %). Данные расхождения связаны с точностью/правильностью подбора законов (зависимостей) сопротивления для пористых тел. Применение подхода пористого тела при моделировании режимов работы технологических систем, включающих оборудование со сложной конструкцией, оправдано, в первую очередь, когда от результата расчетного моделирования требуется спрогнозировать режимы работы системы в целом, а возникающие внутри оборудования локальные процессы – нет. Во вторую очередь, когда необходимо сократить время выполнения расчетов при невысоких имеющихся мощностных возможностях компьютеров. Однако предлагаемый подход имеет недостатки, в частности, достаточно сложной является процедура определения степени пористости моделируемого объекта и законов гидравлического сопротивления, подобранных из эмпирических зависимостей.

**Ключевые слова:** модель пористого тела, сложные технологические системы, теплообменник, метод конечных элементов, гидравлическое сопротивление, механические фильтры.

**Для цитирования:** 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). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1457> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.44.1.006

## Finite element modeling of thermohydraulic processes by the porous body method

S.V. Yaurov✉, A.D. Danilov, K.Y. Gusev

*Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation*

**Abstract.** The paper considers the best-known models of a porous body used to simplify the performance of thermohydraulic calculations by the finite element method. The main approaches and dependencies when using the porous body model in calculations are shown. The results of thermohydraulic calculations using the Darcy porous body model are presented. The calculation of a heat exchanger with spirally wound tubes was performed, the calculation of a complex technological system consisting of mechanical filters of different configurations was performed. The discrepancies between the calculated and actual parameters of the equipment are determined. The use of a porous body model as a hydraulic analogue of equipment using the example of mechanical filters and a heat exchanger showed acceptable

results (deviations from the design values range from 0,1 % to 10 %). These discrepancies are related to the accuracy/correctness of the selection of porous body resistance laws (dependencies). The use of the porous body approach in modeling the operating modes of technological systems including equipment with a complex design is explained, first of all, when it is required to predict the operating modes of the system as a whole from the result of computational modeling, but local processes occurring inside the equipment are not. Secondly, when it is necessary to reduce the time for performing calculations with low available power capabilities of computers. However, the proposed approach has disadvantages, in particular, the procedure for determining the degree of porosity of the simulated object and the laws of hydraulic resistance selected from empirical dependencies is quite complex.

**Keywords:** porous body model, complex technological systems, heat exchanger, finite element method, hydraulic resistance, mechanical filters.

**For citation:** Yaurov S.V., Danilov A.D., Gusev K.Yu. Finite element modeling of thermohydraulic processes by the porous body method. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1457> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.44.1.006 (In Russ.).

## Введение

Метод конечных элементов (МКЭ) позволяет расчетным образом определить технические характеристики исследуемого оборудования / системы, определить локальные процессы, возникающие внутри. Использование МКЭ в теплогидравлических расчетах подразумевает создание трехмерной расчетной области (с последующим разбиением на малые элементы упорядоченным образом), учитывающей конструктивные особенности оборудования [1-5]. В случае, когда оборудование имеет простую конструкцию, выполнение данной операции является несложной задачей. Однако для оборудования, имеющего в своем составе большое количество элементов сложной формы, при создании трехмерной расчетной области возникают некоторые трудности, приводящие к большим временным затратам для выполнения расчетов.

Для решения задач, основной целью которых является прогнозирование режимов работы технологических систем (при которых локальные процессы внутри оборудования не являются целью решения задачи), имеющих в своем составе оборудование сложной конфигурации, подход моделирования расчетной области «в лоб» неприемлем и проблематичен. В этих случаях прибегают к различным подходам и моделям, которые связаны с упрощением расчетной области.

Одним из таких направлений является применение модели пористого тела.

Модель пористого тела позволяет выполнять расчет систем со сложными элементами, имитируя их гидравлические сопротивления. Пористое тело заменяется сплошной средой с эквивалентным гидравлическим сопротивлением. Опыт применения модели пористого тела рассматривался авторами ранее применительно для моделирования течения жидкометаллического теплоносителя в баках быстрых реакторов [6, 7].

В текущем материале приведены популярные модели пористого тела (Модель Дарси, Модель Дарси-Форхгемера, Модель Бринкмана), используемые в численных расчетах. Показаны основные подходы и зависимости при использовании модели пористого тела в расчетах.

Представлены результаты теплогидравлических расчетов с применением модели пористого тела Дарси:

1) выполнен расчет теплообменного аппарата со спирально навитыми трубками, определены температура на выходе из теплообменного аппарата и расходы, расхождения с реальными параметрами теплообменника;

2) выполнен расчет сложной технологической системы, имеющей в своем составе механические фильтры различной конфигурации. Определены расхождения расчетных и реальных параметров системы.

Верификация (проверка) указанных подходов является достаточно актуальной задачей.

Общая цель работы заключается в оценке применимости подхода с использованием пористого тела при численном моделировании режимов работы оборудования и технологических систем их содержащих.

### Материалы и методы

Самые используемые модели пористого тела:

- модель Дарси;
- модель Дарси-Форхгеймера;
- модель Бринкмана.

Модель Дарси – простейшая закономерность, и она имеет ряд ограничений при описании различных потоков. 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.

Для пористых сред с большой пористостью и высокой проницаемостью используется расширенная форма закона Дарси, учитывающая как квадратичную по скорости силу сопротивления (закон Форхгеймера), так и обычные инерционные слагаемые, свойственные уравнению Навье-Стокса.

Другим широко известным способом расширения модели Дарси при описании течения в высокопроницаемых средах со значительной пористостью является модель Бринкмана. Уравнения Бринкмана описывают быстрое течение жидкостей в пористой среде с учетом инерционных эффектов, градиента давления и действия гравитационной силы.

Наиболее широко употребляемой на практике моделью пористой среды является закон Дарси [6, 7]:

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

где  $\bar{V}_p$  – скорость движения жидкости в порах,  $p$  – давление,  $\varphi$  и  $K$  – пористость и проницаемость среды,  $\rho$  и  $v$  – плотность и кинематическая вязкость,  $\bar{g} = -g \bar{\gamma}$  – ускорение силы тяжести,  $\bar{\gamma}$  – единичный вектор, направленный вертикально вверх. Индекс  $p$  обозначает величины, относящиеся к пористой среде.

Полная пористая модель одновременно является обобщением уравнений Навье-Стокса и закона Дарси, обычно используемых для течений в пористых областях.

Модель можно использовать для моделирования потоков, где геометрия слишком сложна. Модель сохраняет условия диффузии и поэтому может быть использована для течений в пучках стержней или труб, где такие эффекты несущественны.

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

Выражение для расчета потери давления на трение в Ansys CFX имеет вид [8]:

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

где  $CR$  – приведенный коэффициент сопротивления, имеющий размерность  $[\text{кг}/\text{м}^4]$ .

Выражение для расчета потери давления на трение имеет следующий вид:

$$\Delta p_3 = \left( \xi_0 + \lambda \frac{\Delta l}{d_r} \right) \frac{\rho U^2}{2} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon} \right), \quad (3)$$

где  $\xi_0$  – местные сопротивления,  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления,  $d_r$  – гидравлический диаметр [м],  $\Delta l$  – длина пути [м],  $\rho$  – плотность теплоносителя [кг/м<sup>3</sup>],  $U$  – скорость теплоносителя [м/с],  $\varepsilon$  – пористость модели.

Степень пористости рассчитывается по следующему выражению:

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

где  $\frac{V_{ж}}{V_0}$  – отношение объема жидкости в теплообменнике к общему объему теплообменника / оборудования.

Коэффициенты гидравлического сопротивления ( $\lambda$ ) рассчитываются исходя из специфических законов сопротивления для каждого пористого тела, с учетом особенностей конструкции теплообменника.

Имеем систему уравнений, из которой выводится выражение для определения приведенных коэффициентов сопротивления трению как для продольного, так и для поперечного течения:

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_3 &= \left( \xi_0 + \lambda \frac{\Delta l}{d_r} \right) \frac{\rho U^2}{2} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)^2 \\ \frac{\Delta p}{\Delta l} &= CR \cdot U^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow CR = \left( \frac{\xi_0}{\Delta l} + \frac{\lambda}{d_r} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)^2. \quad (5)$$

Решение гидравлических задач в Ansys CFX с применением модели пористого тела сводится к определению следующих параметров и зависимостей:

- 1) определение степени пористости  $\varepsilon$ ;
- 2) определение эмпирических зависимостей законов сопротивления исходя из особенностей геометрии моделируемого объекта;
- 3) определение приведенных коэффициентов продольного и поперечного сопротивления с учетом наличия / отсутствия местных сопротивлений.

*Выполнение теплогидравлического расчета регенеративного теплообменного аппарата со спирально навитыми трубками.* Исходной геометрией (объектом) для проведения численного моделирования является регенеративный теплообменный аппарат со спирально навитыми трубками.

Данный теплообменник применен в составе системы продувки и дренажей парогенераторов Нововоронежской АЭС-2. Общий вид теплообменника (РТО) представлен на Рисунке 1. Основные характеристики при номинальном режиме работы РТО представлены в Таблице 1 [9].

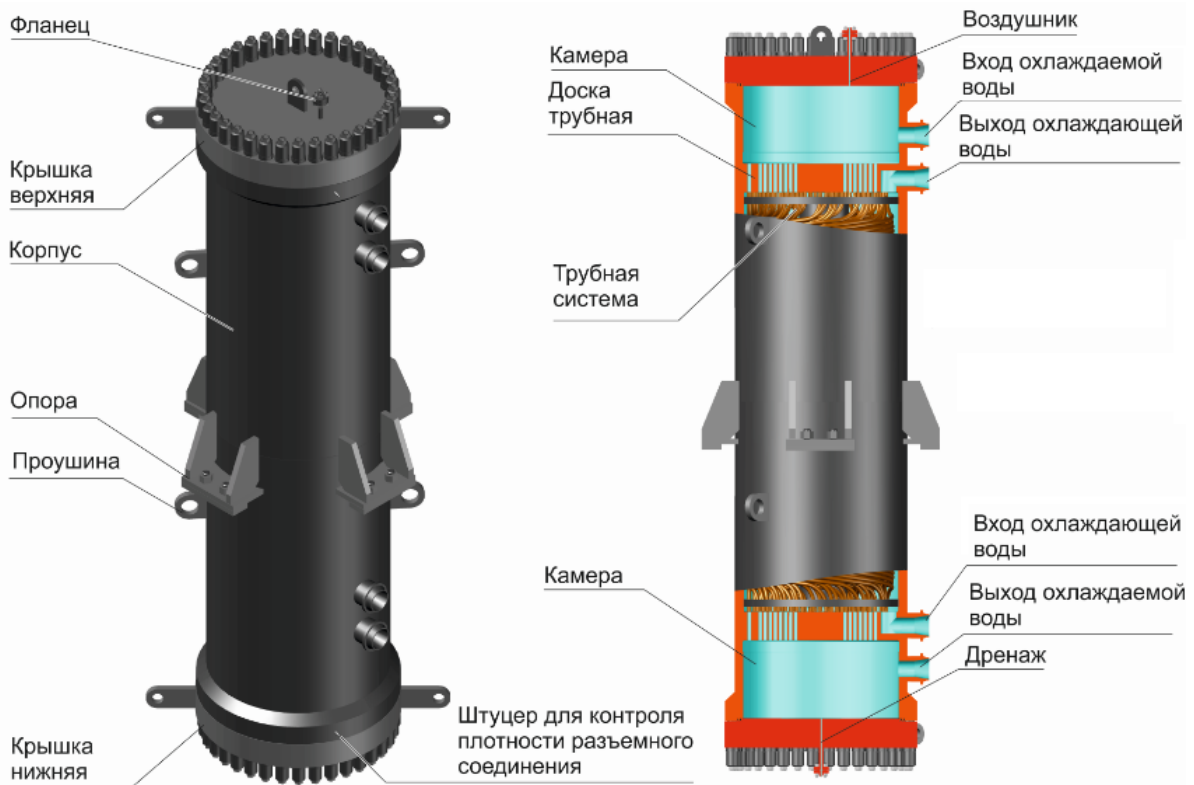


Рисунок 1 – Общий вид теплообменника (РТО)  
Figure 1 – General view of the heat exchanger (RHE)

Таблица 1 – Основные характеристики РТО  
Table 1 – Main characteristics of RHE

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 <sup>2</sup>	310
Наружный диаметр и толщина корпуса в центральной части, мм	1200×65
Общая высота теплообменника, мм	5373
Температура на входе в РТО охлаждающей среды (межтрубное пространство), °С	50
Температура на выходе из РТО охлаждающей среды (межтрубное пространство), °С	237–251
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

Особенностью конструкции РТО являются спирально-навитые теплообменные трубки, моделирование геометрии которых напрямую является трудоемким процессом.

При моделировании работы теплообменника с помощью модели пористого тела выбран следующий подход:

- 1) Спиральные трубки были условно разбиты на 7 групп;

- 2) Для каждой группы была создана фигура-аналог в рамках геометрии РТО;
- 3) Для каждой группы были определены зависимости коэффициентов сопротивления трению согласно формулам 4, 5 и [10, 11].

Разработанная расчетная область представлена на Рисунке 2.

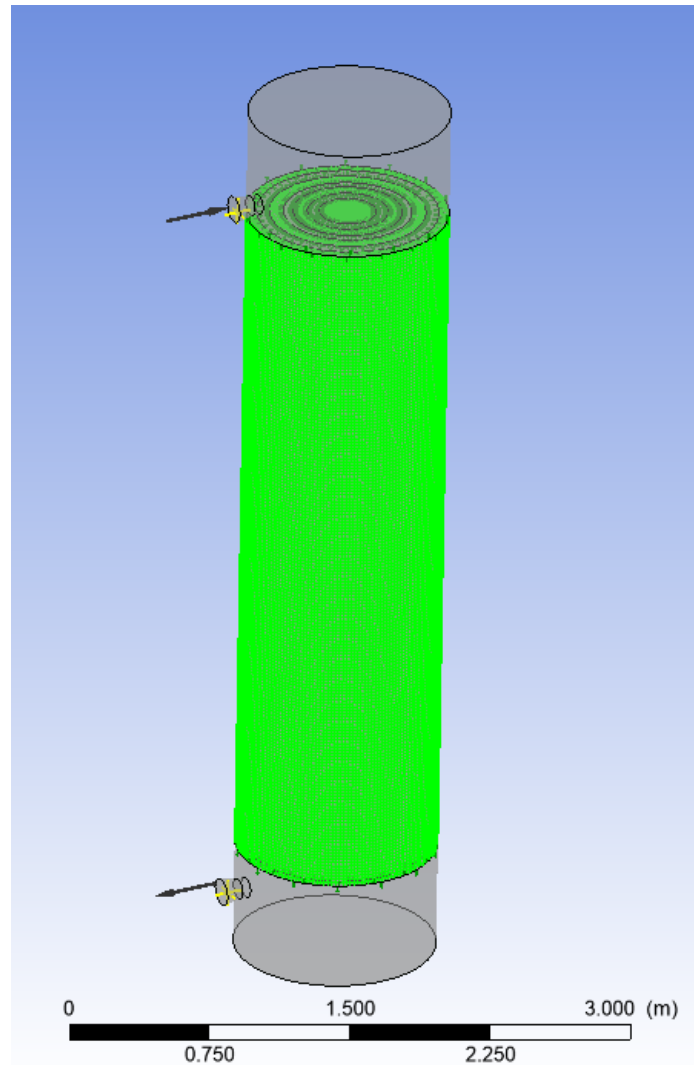


Рисунок 2 – Разработанная расчетная область теплообменника (РТО) по трубному пространству с разбиением на 7 групп

Figure 2 – Developed design area of the heat exchanger (RHE) in the pipe space divided into 7 groups

Основная цель численного моделирования режима работы РТО – выполнить расчет номинального режима работы теплообменного аппарата со спиральнонавитыми трубками (РТО) по трубному пространству с использованием модели пористого тела методом конечных элементов с последующим сравнением с проектными (реальными) характеристиками.

*Выполнение расчета сложной технологической системы, имеющей в своем составе механические фильтры.*

Исходной геометрией (объектом) для выполнения гидравлического расчета являются механические фильтры (фильтр предочистки, два одинаковых фильтра тонкой очистки), используемые в составе системы подпитки основной охлаждающей воды Нововоронежской АЭС [12]. Технологическая схема трубопроводов подпитки градирен представлена на Рисунке 3, характеристики режима работы системы представлены в

Таблице 2, конструкция фильтров представлена на Рисунках 4, 5, основные параметры фильтров приведены в Таблице 3.

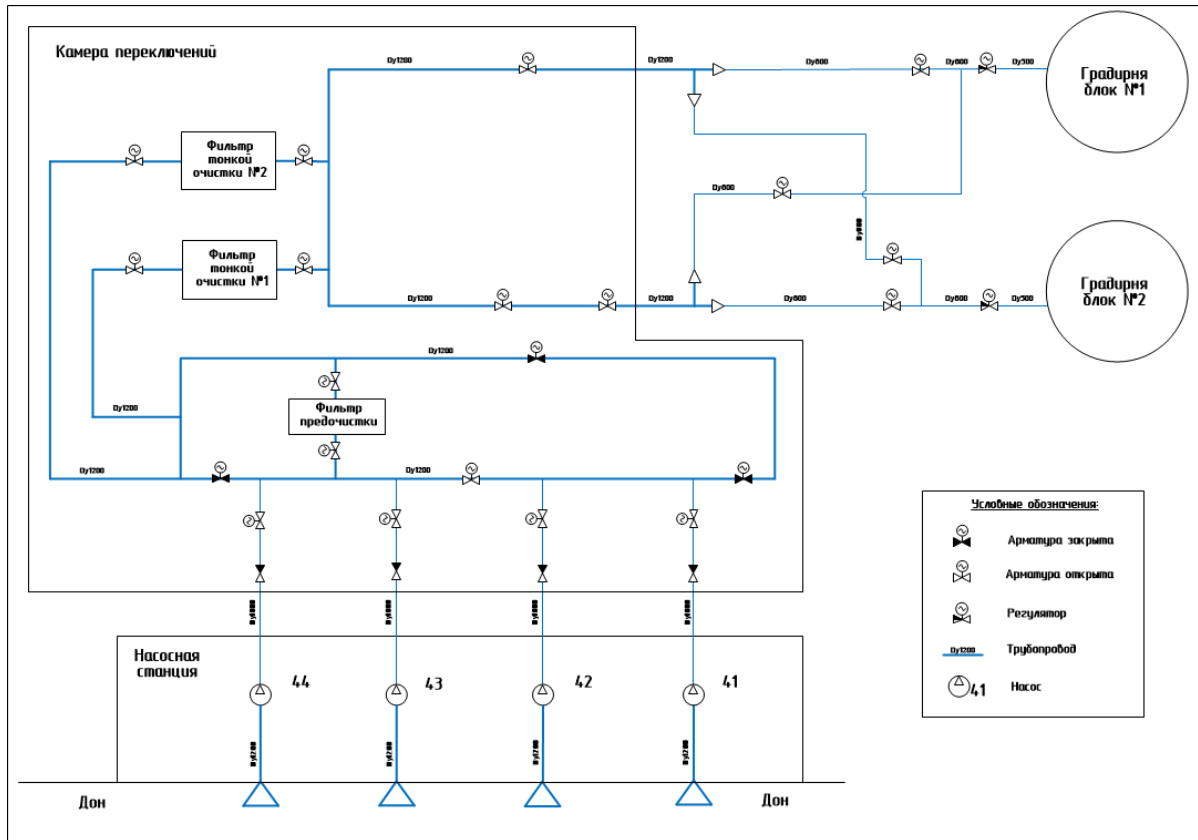


Рисунок 3 – Технологическая схема трубопроводов подпитки градирен  
Figure 3 – Technological scheme of cooling tower recharge pipelines

Таблица 2 – Основные характеристики режима работы системы подпитки градирен  
Table 2 – Main characteristics of the operation mode of the cooling tower recharge system

Параметр	Текущее значение
Количество насосов в работе	2 (№ 44, № 42)
P1 – давление на напоре насосов системы подпитки, МПа	0,62
P2 – давление перед фильтром предочистки, МПа	0,55
P3 – давление после фильтра предочистки, МПа	0,46
P4 – давление перед фильтром тонкой очистки № 1, МПа	0,41
P5 – давление после фильтра тонкой очистки № 1, МПа	0,4
P6 – давление перед фильтром тонкой очистки № 2, МПа	0,41
P7 – давление после фильтра тонкой очистки № 2, МПа	0,4
P8 – давление на градирню блока № 6, МПа	0,4
P9 – давление на градирню блока № 7, МПа	0,4
G – общий расход на подпитку градирен, л/сек.	2613

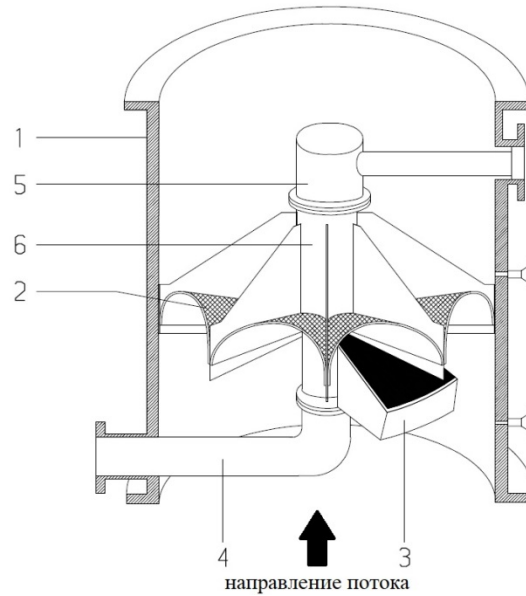


Рисунок 4 – Конструкция механического фильтра предочистки системы подпитки градирен:  
1 – корпус фильтра, 2 – фильтрующая вставка, 3 – ротор обратной промывки, 4 – линия  
обратной промывки, 5 – привод ротора, 6 – подшипниковый узел

Figure 4 – Design of the mechanical pre-cleaning filter of the cooling tower recharge system  
1 – filter housing, 2 – filter insert, 3 – backwash rotor, 4 – backwash line, 5 – rotor drive, 6 – bearing  
assembly

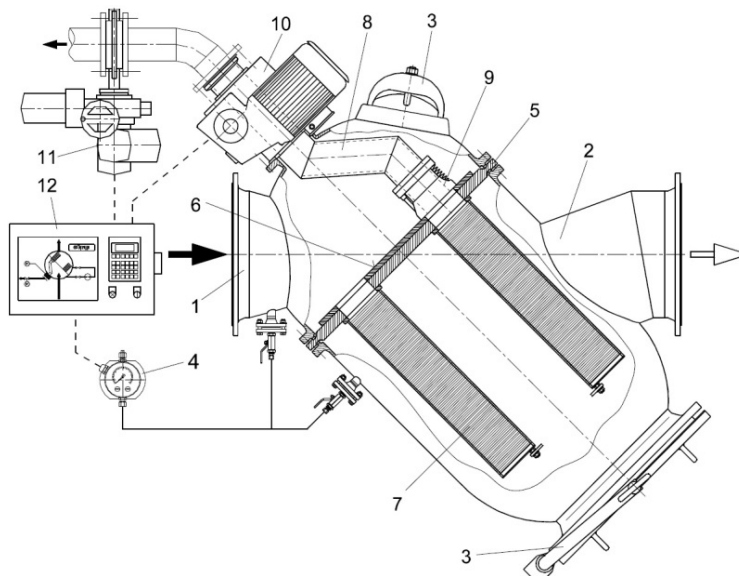


Рисунок 5 – Конструкция механического фильтра тонкой очистки системы подпитки градирен:  
1 – впускная камера, 2 – выпускная камера, 3 – инспекционный люк, 4 – система измерения  
разности давлений, 5 – промежуточное дно, 6 – сегмент скольжения, 7 – фильтровальный  
патрон, 8 – ротор обратной промывки, 9 – промывочный наконечник, 10 – подшипниковый узел  
и привод, 11 – промывочная арматура с сервоприводом, 12 – система управления

Figure 5 – Design of the mechanical fine filter of the cooling tower recharge system  
1 – inlet chamber, 2 – outlet chamber, 3 – inspection hatch, 4 – pressure difference measurement  
system, 5 – intermediate bottom, 6 – sliding segment, 7 – filter cartridge, 8 – backwash rotor, 9 –  
flushing tip, 10 – bearing assembly and drive, 11 – flushing fittings with servo drive, 12 – control  
system



Таблица 3 – Основные параметры механических фильтров  
Table 3 – Main parameters of mechanical filters

Параметр	Значение
<b>Фильтр предочистки</b>	
Номинальный внутренний диаметр, мм	1200
Длина фильтра, мм	1785
Диаметр отверстий, мм	3
Фильтрующий элемент	Перфорированный лист
Максимальный расход, кг/с	14250
<b>Фильтр тонкой очистки</b>	
Диаметр корпуса, мм	1780
Длина фильтра, мм	3590
Точность фильтрации, мкм	1000
Фильтрующий элемент	Фильтровальный патрон
Количество фильтровальных патронов диаметром 137 мм, шт	16
Количество фильтровальных патронов диаметром 217 мм, шт	16
Максимальный расход, кг/с	8500

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

- 1) все фильтры механические заменялись фигурой-аналогом (в виде цилиндра);
- 2) для каждого фильтра определялись зависимости коэффициентов сопротивления трению согласно выражениям 4, 5 и [10, 11];
- 3) выполнялось моделирование одного из режима работы системы (в работе насосы 42, 44) с помощью задания соответствующих граничных условий.

Разработанная расчетная модель представлена на Рисунке 6. Модели-заменители фильтров выделены розовым цветом.

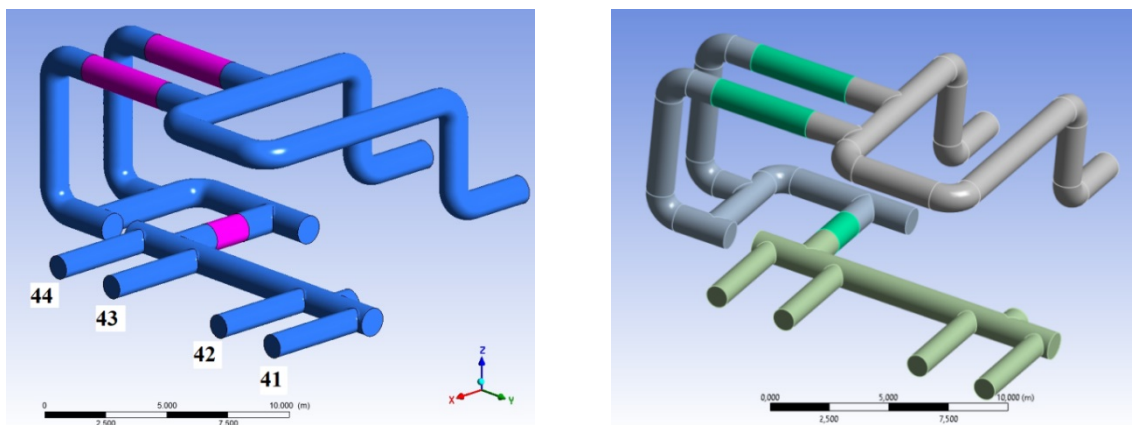


Рисунок 6 – 3D модель трассировки трубопроводов системы подпитки градирен  
Figure 6 – 3D model of pipeline tracing in the switching chamber

Основная цель численного моделирования работы системы подпитки основной охлаждающей воды: выполнить расчет номинального режима работы системы с использованием модели пористого тела (вместо фильтров) методом конечных элементов с последующим сравнением с проектными (реальными) характеристиками.

### Результаты и их обсуждение

Результаты теплогидравлического расчета регенеративного теплообменного аппарата со спиральнонавитыми трубками. Результаты расчета режима работы регенеративного теплообменника и сравнение с реальными его характеристиками представлены в Таблице 4.

На Рисунке 7 представлены распределения скорости и температуры по вертикальному сечению модели теплообменника.

Таблица 4 – Результаты расчета режима работы регенеративного теплообменника  
Table 4 – Calculation results of the regenerative heat exchanger operating mode

Параметр	Расчётное значение	Проектное (реальное) значение	$\Delta$ , %
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	$\leq 100$	4
Расход среды, т/ч	140	140	*

\* – параметр использовался в качестве граничных условий в расчетной модели

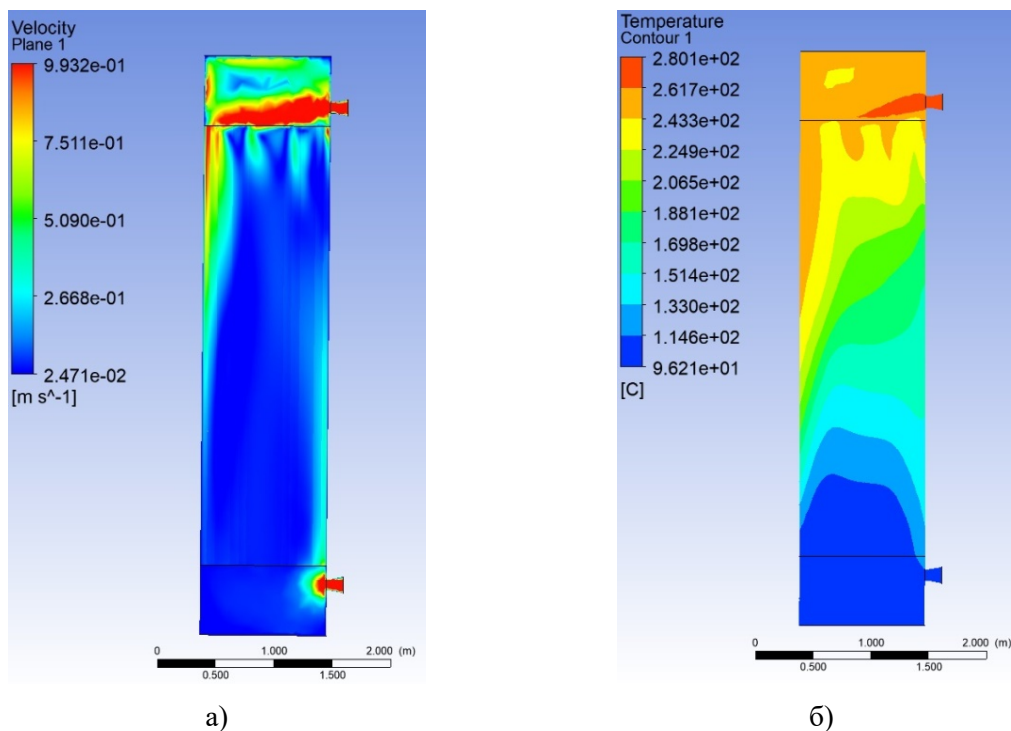


Рисунок 7 – Расчетное распределение скорости и температуры в вертикальном сечении теплообменника

а) поле распределения скорости; б) поле распределения температуры

Figure 4 – Calculated distribution of speed and temperature in the vertical section of the heat exchanger

a) velocity distribution field; b) the temperature distribution field

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.

*Результаты математического моделирования механических фильтров в составе системы подпитки градирен.* Результаты расчета номинального режима работы системы подпитки градирен и сравнение с реальными параметрами в системе представлены в Таблице 5.

Таблица 5 – Результаты расчета номинального режима работы системы подпитки  
Table 5 – Calculation results of the recharge system nominal operating mode

Параметр	Расчетное значение	Проектное (реальное) значение	$\Delta$ , %
P1 – давление на напоре насосов системы, МПа	0,62	0,62	*
P2 – давление перед фильтром предочистки, МПа	0,608	0,55	9,53
P3 – давление после фильтра предочистки, МПа	0,457	0,46	0,14
P4 – давление перед фильтром тонкой очистки № 1, МПа	0,45	0,41	8,89
P5 – давление после фильтра тонкой очистки № 1, МПа	0,405	0,4	1,23
P6 – давление перед фильтром тонкой очистки № 2, МПа	0,45	0,41	0,89
P7 – давление после фильтра тонкой очистки № 2, МПа	0,406	0,40	1,48
P8 – давление на градирню блока № 6, МПа	0,404	0,40	0,99
P9 – давление на градирню блока № 7, МПа	0,405	0,40	1,23
G – общий расход на подпитку градирен, л/сек.	2613	2613	*

\* – параметр использовался в качестве граничных условий в расчётной модели

На Рисунке 8 представлено поле скорости воды в горизонтальном разрезе фильтра предочистки и фильтров тонкой очистки № 1, 2 полученное по результатам расчета.

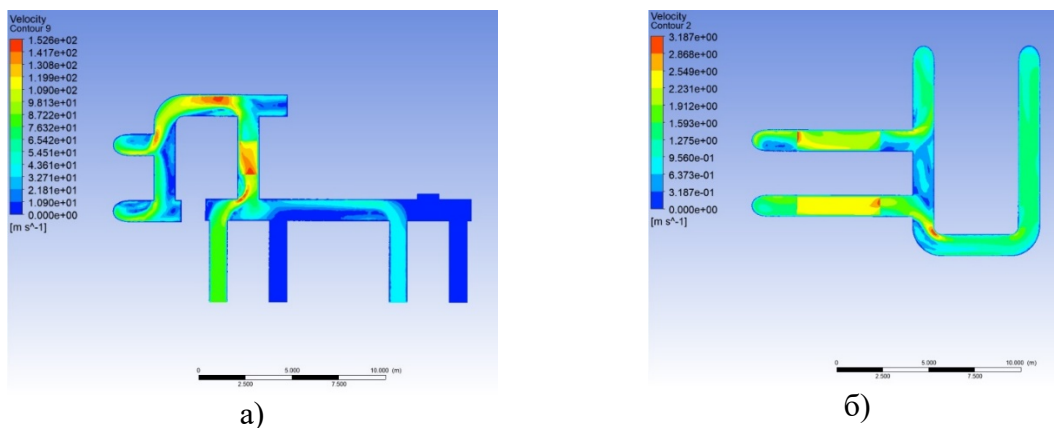


Рисунок 8 – Расчетное поле скорости  
а) горизонтальный разрез фильтра предочистки;  
б) горизонтальный разрез фильтров тонкой очистки № 1, 2.  
Figure 8 – Calculated velocity field  
а) horizontal section of the pre-cleaning filter;  
б) horizontal section of fine filters No. 1,2.

Исходя из данных Рисунка 8 и Таблицы 4, можно сделать вывод, что авторами выбраны подходящие законы сопротивления, а расчетная модель в полном объеме описывает номинальный режим работы технологической системы.

Анализ расчетных данных выявил незначительные расхождения в части значений давления до фильтров и после. Это говорит о том, что коэффициенты гидравлического сопротивления для пористых тел подобраны правильно.

### Заключение

1. Рассмотрен подход с применением модели пористого тела при проведении теплогидравлических расчетов методом конечных элементов.

Из существующих моделей для моделирования течения среды в сложных технологических системах выбрана Модель Дарси, по причине совокупности условий применимости (степени пористости 0,1–0,6 моделируемого оборудования).

2. Выбраны два типа оборудования (регенеративный теплообменник, механический фильтр) для проведения оценочного расчета с применением модели пористого тела.

3. Определены основные подходы в определении гидравлических коэффициентов сопротивления выбранного оборудования исходя из эмпирических зависимостей [10, 11].

4. Результаты тестовых (верификационных) расчетов показали:

– приемлемую точность результатов, как для режимов работы регенеративного теплообменника, так и для механического фильтра. Отклонения от проектных (реальных) величин составляет от 0,1 % до 10 %;

– разбиение моделируемого объекта на большее количество пористых тел, каждое из которых обладает своими законами сопротивления, приводит к более точным результатам расчета;

– для каждого пористого тела потребуется определение специфических законов сопротивления, а также степени пористости.

5. В целом применение подхода пористого тела при моделировании режимов работы сложных технологических систем, включающих оборудование со сложной конструкцией, оправдано, в первую очередь, когда от результата расчетного моделирования требуется спрогнозировать режимы работы системы в целом, а возникающие внутри оборудования локальные процессы – нет. Во вторую очередь, когда необходимо сократить время выполнения расчетов при невысоких имеющихся мощностных возможностях компьютеров.

Однако предлагаемый подход имеет недостатки, в частности, достаточно сложной является процедура определения степени пористости моделируемого объекта и законов гидравлического сопротивления, подобранных из эмпирических зависимостей. Чтобы нивелировать этот недостаток, авторами работы рассматривается вопрос о разработке нейросетевой модели, позволяющей предлагать зависимости (законы) сопротивления для пористого тела, исходя из определяемых пользователем признаков расчетной области оборудования.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Буряка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов И.Е. *Инженерный анализ в Ansys Workbench*. Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-т; 2010. 271 с.
2. Ильин В.П. *Методы конечных разностей и конечных объемов для эллиптических уравнений*. Новосибирск: Изд-во Ин-та математики; 2000. 345 с.
3. Белова О.В., Волков В.Ю., Скибин А.П., Николаева А.В., Крутиков А.А., Чернышев А.В. Методологические основы CFD-расчетов для поддержки проектирования

- пневмогидравлических систем. *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2013;17(5):45.
4. Снегирёв А.Ю. *Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: учебное пособие*. СПб: Изд-во Политехн. ун-та; 2009. 143 с.
  5. Чигарев А.В., Кравчук, А.С., Смалюк А.Ф. *ANSYS для инженеров. Справочное пособие*. М.: «Машиностроение-1»; 2004. 512 с.
  6. 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.
  7. 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. *Теплофизические экспериментальные и расчетно-теоретические исследования в обоснование характеристик и безопасности ядерных реакторов на быстрых нейтронах (Теплофизика-2012): Сборник докладов научно-технической конференции «Теплофизика-2012»* Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ; 2013. с. 216–227.
  8. *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*. Canonsburg, 2011. 402 p.
  9. 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.
  10. Идельчик И.Е. *Справочник по гидравлическим сопротивлениям*. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение; 1992. 672 с.
  11. Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С. *Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике*. М.: ИздАт; 2010. 776 с.
  12. 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). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1371>. DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.024. (дата обращения: 10.10.2023).

## REFERENCES

1. Buryaka V.A., Fokin V.G., Soldusova E.A., Glazunova N.A., Adeyanov I.E. *Engineering analysis in Ansys Workbench*. Samara, Publishing House of Samara State Technical University; 2010. 271 p. (In Russ.).
2. Ilyin V.P. *Methods of finite differences and finite volumes for elliptic equations*. Novosibirsk, Publishing House of the Institute of Mathematics; 2000. 345 p. (In Russ.).
3. Belova O.V., Volkov V.Yu., Skibin A.P., Nikolaeva A.V., Krutikov A.A., Chernyshev A.V. Methodological foundations of CFD calculations to support the design of pneumohydraulic systems. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*. 2013;17(5):45. (In Russ.).
4. Snegirev A.Yu. *High-performance computing in technical physics. Numerical simulation of turbulent flows: a textbook*. Saint Petersburg, Publishing House of the Polytechnic University; 2009. 143 p. (In Russ.).
5. Chigarev A.V., Kravchuk, A.S., Smalyuk A.F. *ANSYS for engineers. Reference manual*. Moscow, Mechanical engineering-1; 2004. 512 p. (In Russ.).
6. 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

- non-isothermal coolant flow in the porous body model of a fast breeder reactor. *Izvestia vuzov. Yadernaya energetika = News of universities. Nuclear power engineering*. 2013;4:78–85. (In Russ.).
7. 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. *Teplofizicheskie eksperimental'nye i raschetno-teoreticheskie issledovaniya v obosnovanie kharakteristik i bezopasnosti yadernykh reaktorov na bystrykh neitronakh (Teplofizika-2012): Sbornik dokladov nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Teplofizika-2012"*. Obninsk, IPPE JSC; 2013. p. 216-227. (In Russ.).
  8. *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*. Canonsburg, 2011. 402 p.
  9. 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 AE-2006 project (RU V-392M). *Izvestia vuzov. Yadernaya energetika = News of universities. Nuclear power engineering*. 2022;2:27–36. DOI: 10.26583/npe.2022.2.03. (In Russ.).
  10. Idelchik I.E. *Handbook of hydraulic resistances*. 3rd ed., revised and enlarged. Moscow, Mechanical engineering; 1992. 672 p. (In Russ.).
  11. Kirillov P.L., Bobkov V.P., Zhukov A.V., Yuryev Y.S. *Handbook of thermohydraulic calculations in nuclear power engineering*. Moscow, IzdAt; 2010. 776 p. (In Russ.).
  12. Yaurov S.V. Danilov A.D. Gusev K.Y. Gusev I.N., Mathematical modeling of composite technological systems by the finite element method. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1371>. DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.024 (accessed on 10.10.2023). (In Russ.).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Яуров Сергей Васильевич**, аспирант, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

*e-mail*: [yaurovsv@gmail.com](mailto:yaurovsv@gmail.com)

ORCID: [0009-0000-9269-6524](https://orcid.org/0009-0000-9269-6524)

**Sergey V. Yaurov**, Postgraduate Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation

**Данилов Александр Дмитриевич**, доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

*e-mail*: [danilov-ad@yandex.ru](mailto:danilov-ad@yandex.ru)

ORCID: [0000-0002-1534-5285](https://orcid.org/0000-0002-1534-5285)

**Aleksandr D. Danilov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.

**Гусев Константин Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

*e-mail*: [gusev\\_konstantin@mail.ru](mailto:gusev_konstantin@mail.ru)

ORCID: [0000-0002-0517-5737](https://orcid.org/0000-0002-0517-5737)

**Konstantin Y. Gusev**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 12.10.2023; одобрена после рецензирования 10.11.2023; принята к публикации 31.01.2024.*

*The article was submitted 12.10.2023; approved after reviewing 10.11.2023; accepted for publication 31.01.2024.*