

УДК 532.546.2

# Исследование особенностей теплообмена и гидродинамики в пористой среде на примере кубической упаковки шаров\*

А.П. Королева<sup>1,2</sup>, М.С. Французов<sup>2,3</sup>, И.С. Антаненкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 112250, Россия

<sup>2</sup> Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва, 111116, Россия

<sup>3</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана), Москва, 105005, Россия  
e-mail: anastkykoroleva@mail.ru, mfrancuzov@yandex.ru, antanenkovais@mail.ru

Поступила в редакцию 16.04.2019

После доработки 28.08.2019

Принята к публикации 29.08.2019

Теплообменные аппараты с шаровой засыпкой широко распространены в различных областях техники. Эффективность такого теплообменного аппарата определяется характеристиками пористой среды и параметрами теплоносителя, поэтому корректное описание термогидродинамических процессов в ней является важной задачей. В предлагаемой модели пористая среда представлена в виде слоев стальных шаров кубической упаковки. Характеристики процессов гидродинамики и теплообмена в ней определяются с учетом зависимости от температуры теплофизических свойств газа, движущегося через пористую среду. В результате моделирования получены стационарные картины распределения температур шаровой засыпки и газа, а также продольной составляющей скорости потока в поровом пространстве. Разработанная модель позволяет получить достоверные результаты в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Проведено сопоставление полученных результатов с эмпирическими данными, что позволяет рекомендовать применение предлагаемой модели для определения интегральных характеристик теплообменного аппарата с шаровой засыпкой.

**Ключевые слова:** пористая среда, шаровая засыпка, кубическая упаковка, тепловые и гидравлические характеристики, численное моделирование

## Введение

Все большее распространение в различных областях техники получают теплообменники постоянного и периодического действия, заполненные шаровой засыпкой. В атомной энергетике они предлагаются в качестве микротвэлов реактора [1], в тепловой энергетике – для высокотемпературных подогревателей воздуха перспективных ПГУ с газификацией угля [2], в ракетных двигателях – для тепловой защиты камеры сгорания, в теплообменных аппаратах регенеративного типа – в качестве теплоакку-

мулирующего теплоносителя [3, 4]. Особое место данная технология занимает в процессах химической, пищевой промышленности, в процессах конденсации, фильтрации и др. [5].

Поведение теплоносителя в поровом (свободном) пространстве шаровой засыпки определяет эффективность работы теплообменного аппарата, что обуславливает необходимость и актуальность исследования процессов гидродинамики и теплообмена в нем.

Цель данной работы – получение тепловых и гидравлических характеристик процессов, протекающих в пористой среде. Достижение поставленной цели планируется выполнить численным моделированием процессов течения и

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-08-00704.

теплообмена в аппарате регенеративного типа с шаровой засыпкой.

Одна из ключевых задач проводимого исследования – определение полей температур, скоростей и линий тока в поровом пространстве и твердом теле засыпки для различных режимов течения. Для ее решения предлагается использовать программный пакет численного моделирования, который позволяет рассчитать стационарные распределения параметров гидродинамики и теплообмена в широком диапазоне чисел Рейнольдса (RANS-подход).

Полученные результаты дадут возможность определить как локальные, так и интегральные тепловые и гидравлические характеристики пористой среды, выявить области наиболее эффективного теплообмена, а также «паразитные» области, в которых происходит нарастание гидравлического сопротивления. Достоинством применения такого подхода к описанию пористой среды является возможность формирования наиболее полной картины течения и теплообмена в поровом (как труднодоступной области) и межпоровом пространстве, а также возможность получения теплогидравлических характеристик в широком диапазоне варьируемых параметров. Кроме того, не изменяя геометрической модели, можно оценить влияние продольных и поперечных эффектов теплопроводности, влияние переменности теплофизических свойств рабочего тела, выявить местоположение застойных зон и др.

Слои, сформированные упаковкой шаровой засыпки, представляют собой пористую среду. Описание свойств пористой среды, как правило, осуществляется на основе представления ее в виде сплошной, обладающей некоторыми эффективными характеристиками. К этим характеристикам относят параметры твердого тела (пористость  $\Pi$  или объемную долю концентрации твердой фазы  $\phi$ ) и параметры движущегося через среду газа [6]. Определение этих характеристик осуществляется с помощью теоретических и экспериментальных методов исследования.

Традиционным теоретическим методом является осреднение уравнений сохранения массы, импульса и энергии по объему, содержащему множество слоев шаровой засыпки и некоторый объем газа между ними. Полученные дифференциальные уравнения выражают связь

между характеристиками пористой среды (средней скоростью течения газа, температурой твердого тела и газа, давлением газа) в форме интегралов по поверхности и объему пористого слоя. Прямое вычисление этих интегралов обычно не проводят, поскольку оно довольно трудоемко, поэтому для получения характеристик пористой среды прибегают к экспериментальным методам исследования процессов гидродинамики и теплообмена в шаровой засыпке регулярной структуры. В частности, в работе [7] представлены результаты экспериментальных исследований гидродинамических и тепловых процессов в засыпках шаровых тепловыделяющих элементов, в том числе при движении одно- и двухфазных сред и кипении. В работе [8] описан большой объем экспериментальных данных о внутренней теплоотдаче к однофазному теплоносителю в неупорядоченных пористых структурах разного класса в широком диапазоне чисел Пекле.

Использование численного моделирования для исследования процессов гидродинамики и теплообмена, протекающих в пористой среде, позволяет не только получить их интегральные характеристики, но и визуализировать их, выявляя особенности. При проектировании сложных технических систем численное моделирование является единственным способом полного анализа процессов, происходящих в таких системах, что подтверждается большим количеством научных работ.

Работа [9] посвящена определению интегральных термогидравлических характеристик перспективных тепловыделяющих сборок, для чего пористая среда была смоделирована в программе посредством использования специализированной опции (поставленная задача решалась авторами в осесимметричной постановке). В работе [10] выполнено численное моделирование процесса течения в фильтре, в котором базовой частью является пористая среда, сформированная микрогранулами. Особое внимание авторами этой работы уделено получению гидравлической характеристики фильтра. В работах [11, 12] приведены результаты экспериментального и численного исследования теплообмена в пористой среде при воздействии высокого потока теплового излучения. Численная модель достаточно проста в реализации и для нее требуются низкие вычислительные

затраты, но это приводит к сравнительно высокой погрешности и только качественному совпадению с экспериментом.

В работе [13] представлено сравнение численных и экспериментальных результатов, полученных для системы накопления энергии с шариками глинозема. Вычислительная область в моделировании представлена осесимметричным резервуаром цилиндрической формы, заполненным пористой средой. Для расчета температуры жидкой и твердой фаз в пористой среде авторы используют модель локального теплового равновесия, результаты показывают хорошее совпадение с экспериментом. В работе [14] с помощью численной модели, учитывающей постоянство свойств жидкости и твердого тела и пренебрегающей тепловыми потерями, проанализирована эффективность работы системы хранения теплоты.

В настоящей работе предлагается использовать модель, в которой пористая среда представлена в виде полноразмерных шаровых элементов, что позволяет исследовать особенности течения и теплообмена как в отдельном элементе среды (шаре), так и в поровом пространстве. Таким образом, исследование процессов гидродинамики и теплообмена в предлагаемой модели в совокупности с учетом зависимости теплофизических свойств газа, движущегося через пористую среду, от температуры, позволит обеспечить более высокую точность и достоверность результатов по сравнению с полученными ранее.

### Постановка задачи

Рассматривается стационарный процесс теплообмена между пористой средой, представленной кубической упаковкой шаров, и горячей газовой воздушной смесью.

Данный тип упаковки выбран ввиду относительной простоты визуализации и расчета, а также идентичности модели реальному расположению частиц шаровой засыпки в теплообменном аппарате.

Упорядоченная пористая структура представлена в виде слоев из стальных твердотельных шаров.

Геометрические характеристики рассматриваемой упаковки шаров представлены в табл. 1.

Горячий газ с температурой  $T_{вх}$  и скоростью  $u$  поступает в кубическую упаковку (рис. 1),

Таблица 1. Геометрические характеристики кубической упаковки

Характеристика	Значение
Диаметр шара $D$ , мм	20
Пористость $\Pi$	0.476
Минимальное относительное проходное сечение между частицами $\Psi_{\min}$	0.214

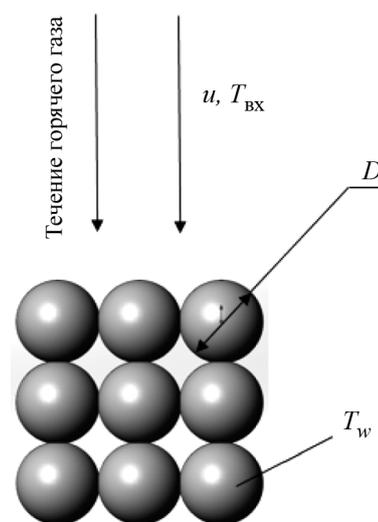


Рис. 1. Расчетная схема

где, проходя между ее элементами, омывает их и нагревает, отдавая часть своей теплоты. При этом газ, соответственно, охлаждается.

В результате численного моделирования данного процесса необходимо получить картины изменения газодинамических параметров, интегральные теплогидравлические характеристики процесса, а также оценить применимость использования предлагаемого метода численного моделирования к определению интегральных характеристик теплообменного аппарата с шаровой засыпкой.

### Описание расчетной модели и сетки

Трехмерная расчетная модель включает в себя две области: область шаровой упаковки, сформированной шарами одинакового диаметра, и газовую область. В сечении упаковка и газовая область представляют собой квадрат размерами  $3D$  и  $3.5D$  соответственно. Контакт между шарами заменен на небольшой участок перекрытия, что необходимо для работы программы численного моделирования. Участок перекрытия представляет собой область взаимного проникновения шаров, которая заменяет

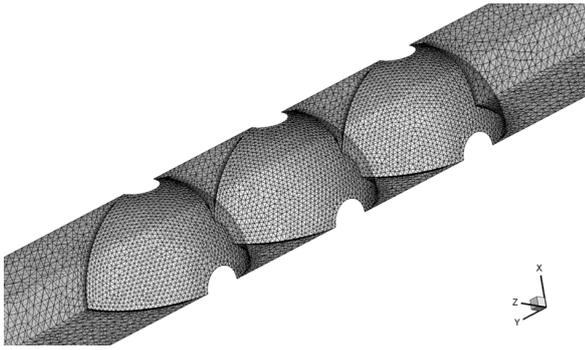


Рис. 2. Фрагмент расчетной сетки для кубической упаковки шаров

точный контакт между ними, влияющий на возможность построения расчетной сетки. Построенная таким образом модель позволяет использовать условие периодичности на боковых гранях при численном моделировании.

На трехмерной модели была построена неструктурированная тетраэдрическая расчетная сетка, адаптированная к поверхности для разрешения теплового и динамического пограничных слоев. Общее число элементов составило примерно 500 тыс. Внешний вид расчетной сетки приведен на рис. 2.

Минимальный размер ячейки был определен при исследовании сеточной сходимости. Тестовые расчеты выполнялись для кубической упаковки на четырех различных сетках, отличающихся высотой пристеночной ячейки и законом нарастания призматического пограничного слоя [15].

### Математическая модель расчета

Расчет проводился в программе численного моделирования в трехмерной постановке. При этом моделировалось стационарное течение и теплообмен при обтекании пакета шаров засыпки горячим газом.

В поровом пространстве, образованном шаровой засыпкой, моделировалось вязкое турбулентное течение газозадушной смеси с переменными теплофизическими свойствами. В твердой области, сформированной кубической упаковкой, решалось уравнение теплопроводности при постоянном коэффициенте теплопроводности стали  $\lambda = 16.27 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)}$ . В газовой области решалась система стационарных уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу, замыкаемая уравнением состояния идеального газа (1) и однопараметрической моделью турбулентности Spalart-Allamaras Realizable (2).

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) &= 0, \quad \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}_m + \boldsymbol{\tau}_t), \\ \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} H) &= \nabla \cdot [\mathbf{U} \cdot (\boldsymbol{\tau}_m + \boldsymbol{\tau}_t) + (\mathbf{q}_m + \mathbf{q}_t)], \quad (1) \\ \rho &= pm / (RT), \end{aligned}$$

где  $\mathbf{U}$  – вектор скорости осредненного течения;  $\boldsymbol{\tau}_m, \boldsymbol{\tau}_t$  – ламинарная и турбулентная составляющие тензора вязких напряжений;  $\mathbf{q}_m, \mathbf{q}_t$  – ламинарная и турбулентная составляющие вектора плотности теплового потока;  $\rho$  – плотность газа;  $p$  – давление газа;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $m$  – молекулярный вес.

$$\begin{aligned} \frac{dv_1}{dt} &= P^v - D^v + \\ &+ \frac{1}{\sigma} \left\{ \nabla \cdot [(v + v_1) \nabla v_1] + c_{b2} [(\nabla v_1) \cdot (\nabla v_1)] \right\} + f_{t1} \Delta U^2, \end{aligned}$$

$$P^v = c_{b1} (1 - f_{t2}) S_1 v_1, \quad (2)$$

$$D^v = \left( c_{w1} f_w - \frac{c_{b1}}{k^2} f_{t2} \right) \left( \frac{v_1}{d_w} \right)^2,$$

где

$$S_1 = \Omega + f_{v2} \frac{v_1}{(kd_w)^2},$$

$$f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}},$$

$$\chi = \frac{v_1}{v},$$

$$f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + c_{v1}^3},$$

$$f_w = g \left( \frac{1 + c_{w3}^6}{g^6 + c_{w3}^6} \right)^{\frac{1}{6}},$$

$$g = r + c_{w2} (r^6 - r),$$

$$r = \frac{v_1}{S_1 (kd_w)^2},$$

$$f_{t1} = C_{t1} g_t \exp \left( -c_{t2} \frac{\omega_t^2}{\Delta U^2} (d^2 + g_t^2 d_t^2) \right),$$

$$f_{t2} = C_{t3} (\exp(-c_{t4} \chi^2)),$$

$$g_t = \min \left( 0.1, \frac{\Delta U}{\omega_t \Delta l_t} \right),$$

$$\omega_t = \Omega_{Wtrip},$$

$$\Delta l_t = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2},$$

$$d_t^2 = (z - z_{trip})^2 + (y - y_{trip})^2 + (x - x_{trip})^2,$$

$$\Delta U = |u - U_{trip}|,$$

$\nu_1$  – кинематическая вихревая вязкость,  $d_w$  – ближайшее расстояние до стенки,  $k = 0.41$  – постоянная Кармана. Модуль тензора завихренности равен

$$\Omega = (2\Omega_{ij}\Omega_{ij})^{\frac{1}{2}},$$

где  $\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ .

Коэффициенты замыкания и вспомогательные функции имеют следующий вид:  $\sigma = 2/3$ ,  $c_{b1} = 0.1355$ ,  $c_{b2} = 0.622$ ,  $c_{w1} = c_{b1}/k^2 + (1 + c_{b2})/\sigma$ ,  $c_{w2} = 0.3$ ,  $c_{w3} = 2$ ,  $c_{v1} = 7.1$ ,  $C_{i1} = 1$ ,  $C_{i2} = 2$ ,  $C_{i3} = 1.2$ ,  $C_{i4} = 0.5$ .

При решении уравнений в программе численного моделирования использовалась численная схема AUSM. Порядок дискретизации параметров – второй.

На входе в расчетную область задавалась скорость горячей газовой смеси, соответствующая числам Рейнольдса  $Re = 10^2 - 2 \cdot 10^5$ , и температура  $T_{вх} = 1000$  К. Температура шаровой упаковки в начальный момент  $T_w = 300$  К.

Следует также отметить, что число Рейнольдса рассчитывалось по эквивалентному гидравлическому диаметру и параметрам газа во входном сечении.

В качестве критериев сходимости численного решения использовались: сходимость невязок скорости и энергии, расхода на входе и выходе в расчетную область и температура шаровой упаковки.

### Результаты численного моделирования

В результате моделирования получены стационарные картины течения и определен характер теплообмена в шаровой засыпке в широком диапазоне чисел Рейнольдса. На рис. 3 и 4 представлены распределения параметров для наиболее характерных режимов течения.

На полученном поле температур горячего газа отчетливо виден горячий «язык», характерный для всех режимов течения, который приводит к незначительному перепаду температур на слое упаковки. Для малых чисел Рейнольдса характерно наличие более высокой температуры в центре сечения упаковки, для больших чисел Рейнольдса температура увеличивается от центра к периферии. С увеличением скорости происходит снижение температурного перепада между входом и выходом засыпки.

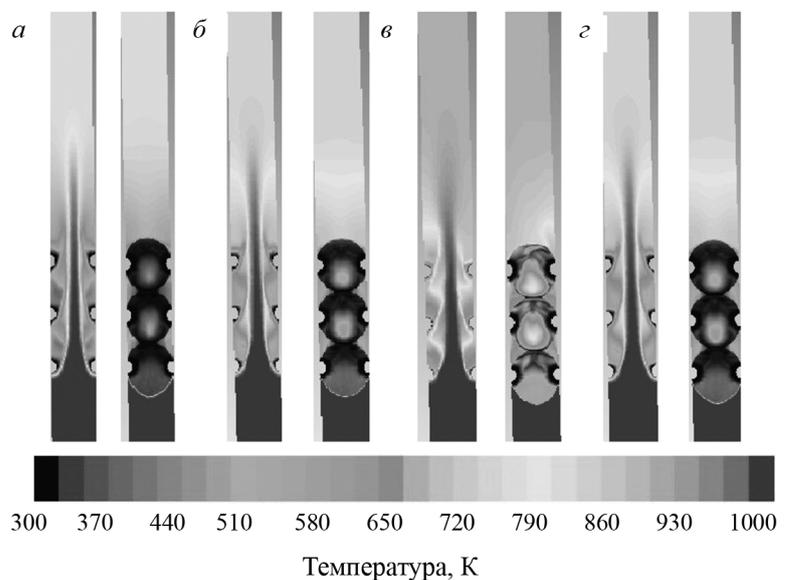


Рис. 3. Поле распределения температуры в твердом теле (справа) и газовой области (слева) для  $Re$ : а –  $2.3 \cdot 10^2$ ; б –  $4.6 \cdot 10^2$ ; в –  $2.3 \cdot 10^3$ ; г –  $4.6 \cdot 10^3$

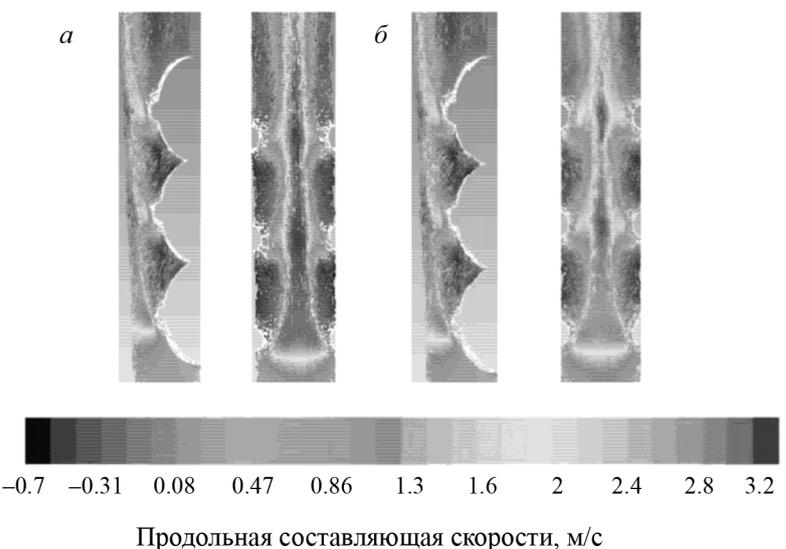


Рис. 4. Поле продольной составляющей скорости в поровом пространстве для  $Re$ : а –  $4.6 \cdot 10^2$ ; б –  $4.6 \cdot 10^3$

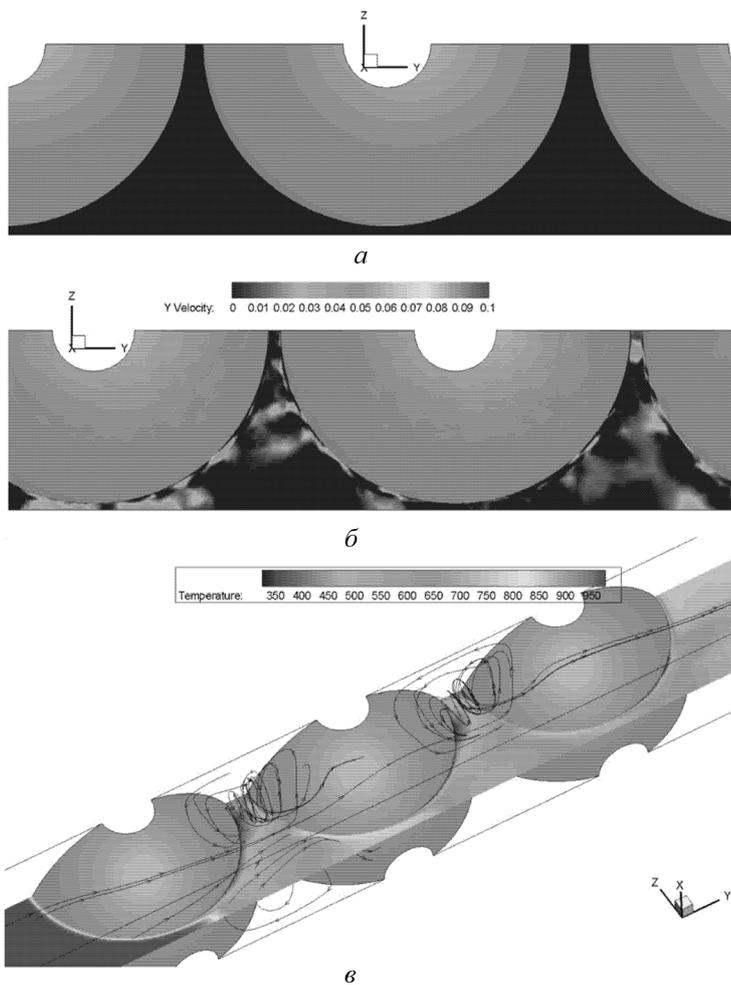


Рис. 5. Картина течения в засыпке: *a* – поровое пространство; *б* – струя трассера; *в* – вихрь в непроточной зоне

Анализ полученных полей продольной составляющей скорости и линий тока в поровом пространстве позволяет отметить неравномерность поля скоростей за слоем шаровой упаковки, которая возрастает с увеличением входной скорости.

На рис. 5 представлены картины структуры течения газозадушной смеси в поровом пространстве, образованном шаровой засыпкой.

При детальном рассмотрении полей течения можно сделать несколько выводов о характере теплообменных процессов между газом и твердой матрицей, сформированной шаровой засыпкой.

Во-первых, по линиям тока отчетливо видны завихренности потока, сформировавшиеся как в продольном, так и в поперечном направлении. Во-вторых, застойные зоны, сформировавшиеся между отдельными шарами, способствуют до-

полнительной диссипации тепловой энергии, но при этом увеличивают потери давления потока. В-третьих, прослеживается четкая динамика нарастания скоростного пограничного слоя, приводящая к отрыву потока.

Большое количество отрывных зон и в целом относительно низкая скорость в пространстве между отдельными слоями шаров свидетельствуют о большей роли теплопроводности в процессе теплообмена, прежде всего, в поперечном направлении потока. На ранее приведенных полях течения продольной составляющей скорости видна центральная неоднородность, а в поперечном направлении скорость отличается на несколько порядков. Таким образом, роль теплопроводности в твердой матрице является доминирующей в механизме переноса теплоты.

### Сравнение результатов с экспериментальными данными

Результаты численного моделирования, полученные в широком диапазоне режимных параметров (некоторые из них приведены в табл. 2), позволяют выявить не только характерные термогидродинамические особенности теплообмена, но и определить интегральные тепловые и гидравлические параметры для упаковки регулярной структуры.

Для сравнения полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными [16] были выбраны тепловая и гидравлическая характеристики процесса определена зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи (числа Нуссельта)  $Nu$  от числа Рейнольдса  $Re$ , а гидравлической – зависимость коэффициента гидравлического сопротивления  $\zeta$  от числа  $Re$ .

Таблица 2. Результаты численного моделирования

Параметр	Расчетные значения				
	$Re$	$3.5 \cdot 10^2$	$2.3 \cdot 10^3$	$1.3 \cdot 10^4$	$4.3 \cdot 10^4$
$Nu$	0.59	12.86	43.31	122.13	164.22
$\zeta$	17.58	0.61	0.41	0.29	0.29

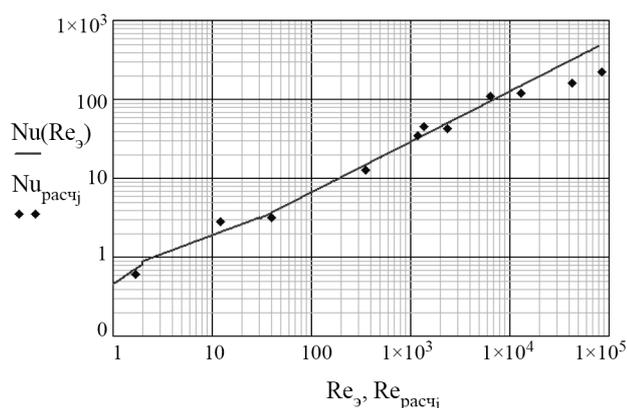


Рис. 6. Тепловая характеристика кубической упаковки, эмпирические и расчетные данные

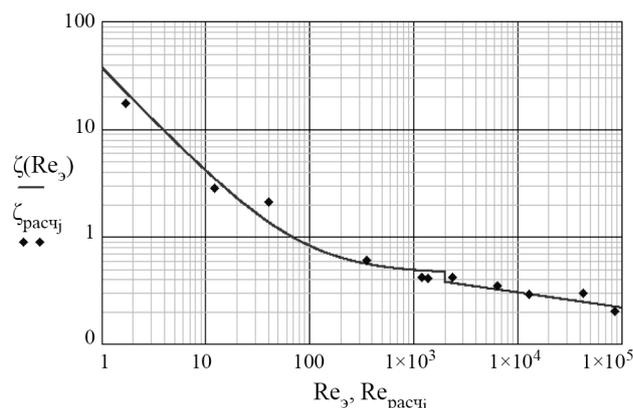


Рис. 7. Гидравлическая характеристика кубической упаковки, эмпирические и расчетные данные

Число  $Nu$  и коэффициента гидравлического сопротивления  $\zeta$  определяются по формулам (3) и (4) соответственно:

$$Nu = \frac{\alpha d_3}{\lambda}, \quad (3)$$

$$\zeta = \frac{2\Delta p d_3}{\rho u^2 l}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи между шаровой упаковкой и газом,  $Вт/(м^2 \cdot К)$ ;  $\Delta p$  – перепад давления газа между входом и выходом из упаковки, Па;  $l$  – высота упаковки, м;  $d_3$  – эквивалентный гидравлический диаметр, определяемый как отношение учетверенной площади поперечного сечения канала к смоченному периметру, м;  $u$  – входная скорость газа, м/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности газа,  $Вт/(м \cdot К)$ ;  $\rho$  – плотность газа,  $кг/м^3$ .

Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными представлено на рис. 6 и 7.

Как можно заметить, отклонение результатов расчетов от экспериментальных данных не превышает 10% как для тепловой, так и для гидравлической характеристики, что говорит о корректности определения интегральных характеристик теплообменных аппаратов с засыпкой с помощью численного моделирования.

## Выводы

В работе выявлены характерные особенности процессов течения и теплообмена в пористой среде, представленной в виде кубической упаковки стальных шаров. Отмечено, что роль

теплопроводности в твердой матрице является доминирующей в механизме переноса теплоты.

Исследование тепловых и гидравлических характеристик процесса на основе численного моделирования во всем диапазоне чисел Рейнольдса показывает хорошее соответствие имеющимся эмпирическим данным. Следовательно, предлагаемая в работе модель может быть рекомендована для определения интегральных характеристик теплообменных аппаратов регенеративного типа с пористой средой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сморгочка Ю.В., Дедов А.В. Численное моделирование гидродинамики и теплообмена в шаровых засыпках // Современная наука. Исследования, идеи, результаты, технологии. 2013. № 1(12). С. 62–67.
2. Клер А.М., Маринченко А.Ю., Потанина Ю.М. Разработка математической модели системы высокотемпературных керамических теплообменников периодического действия // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 3. С. 26–35.
3. Пелевин Ф.В., Пономорев А.В., Семенов П.Ю. К вопросу о применении пористых металлов в регенеративной системе охлаждения жидкостных ракетных двигателей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 5. С. 10–19.
4. Александров В.Ю., Силуянова М.В., Французов М.С., Королёва А.П. Исследование процессов нагрева и охлаждения подогревателя прерывного действия с шаровой засыпкой для авиадвигателей // Авиационная промышленность. 2018. № 1. С. 14–20.
5. Мосина Е.В. Численное исследование течения на границе жидкость–пористая среда // Теоретические основы химической технологии. 2010. Т. 44. № 5. С. 536–542.
6. Сорокин В.В. Гидравлика и теплообмен шаровых засыпок в условиях активной зоны водо-водяных ядерных реакторов с микротрещинами. Минск: Беларус. наука, 2010. 191 с.
7. Лозовецкий В.В., Пелевин Ф.В., Пономорев А.В. Сопротивление и теплообмен в шаровых засыпках при движении одно- и двухфазных сред и кипении // Известия

- тия высших учебных заведений. Машиностроение. 2006. № 7. С. 32–41.
8. **Богоявленский Р.Г.** Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературных ядерных реакторах с шаровыми твэлами. М.: Атомиздат, 1978. 112 с. (Техника ядерных реакторов № 4).
  9. **Сморчкова Ю.В., Авдонина Е.А., Дедов А.В.** Исследование теплогидравлических и нейтронно-физических характеристик перспективных тепловыделяющих сборок для реакторных установок малой мощности // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. №7–8. С. 23–34.
  10. **Гарипов А.А., Константинов С.Ю., Тук Д.Е., Целищев Д.В.** Численное моделирование течения в фильтре // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2013. Т. 17. № 3. С. 153–158.
  11. **Ruiz G., Ripoll N., Zbogar-Rasic A., Jovicic V., Delgado A., Toledo M.** Experimental and numerical analysis of the heat transfer in packed bed exposed to the high thermal radiation flux // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. V. 136. P. 383–392.
  12. **Wu H., Gui N., Yang X., Tu J., Jiang S.** Numerical simulation of heat transfer in packed pebble beds: CFD-DEM coupled with particle thermal radiation // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. V. 110. P. 393–405.
  13. **Cascetta M., Cau G., Puddu P., Serra F.** A comparison between CFD simulation and experimental investigation of a packed-bed thermal energy storage system // Applied Thermal Engineering. 2016. V. 98. P. 1263–1272.
  14. **Wu M., Li M., Xu C., He Y., Tao W.** The impact of concrete structure on the thermal performance of the dual-media thermocline thermal storage tank using concrete as the solid medium // Appl. Energy. 2014. V. 113. P. 1363–1371.
  15. **Ansys 19.0 Documentation.** Houston: Swanson Analysis Systems, Inc. 2005.
  16. **Аэров М.Э., Тодес О.М.** Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. М.: Химия, 1968. 512 с.

### Heat transfer and hydrodynamics specifics study in a porous medium by the example of balls cubic packing

**Koroleva A.P.<sup>1,2</sup>, Frantsuzov M.S.<sup>2,3</sup>, Antanenkova I.S.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Moscow Power Engineering Institute (MPEI), Moscow, 112250, Russia*

<sup>2</sup> *Central Institute of Aviation Motors, Moscow, 111116, Russia*

<sup>3</sup> *Bauman Moscow State Technical University (National research university), Moscow, 105005, Russia*  
*e-mail: anastykoroleva@mail.ru, mfrancuzov@yandex.ru, antanenkovais@mail.ru*

The article discusses numerical simulation results of a porous medium represented by a cubic packing. As the result of modeling, the following stationary distribution patterns of parameters were obtained: the temperatures of the ball backfill and gas, as well as the longitudinal velocity component in the pore space. The obtained flow patterns allow determining the nature of heat transfer in the ball backfill in a wide range of Reynolds numbers. Analysis of the distribution pattern temperature revealed that small Reynolds numbers are characteristic to the presence of a higher temperature in the package center section, while the temperature increases from the center to the periphery for large Reynolds numbers. Analysis of the obtained fields of the velocity longitudinal component and the current lines in the pore space allows note the uneven velocity field behind the ball package layer. A detailed examination of the flow fields in the pore space leads to the conclusion that the role of thermal conductivity in the solid matrix is dominant in the heat transfer mechanism. Also, thermal and hydraulic characteristics of hydrodynamics and heat transfer in a wide range of Reynolds numbers are determined by the calculation method, taking into account the dependence of the thermal properties of the gas moving through it on temperature. The article presents a comparison of thermal-hydraulic characteristics with experimental data, which shows satisfactory compliance. Analysis of the obtained results allows conclude that numerical simulation can be used to determine the integral characteristics of the heat exchanger with ball backfill.

**Keywords:** porous medium, ball backfill, cubic packing, thermal and hydraulic characteristics, numerical simulation.

#### REFERENCES

1. **Smorchkova Yu.V., Dedov A.V.** Chislennoe modelirovanie gidrodinamiki i teploobmena v sharovykh zasypkakh [Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in the pebble bed]. *Sovremennaya nauka. Issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii – Modern science. Research, ideas, results, technologies*, 2013, no. 1(12). pp. 62–67. In Russ.
2. **Kler A.M., Marinchenko A.J., Potanina Yu.M.** Razrabotka matematicheskoy modeli sistemy vysokotemperaturnykh keramicheskikh teploobmennikov periodicheskogo dejstviya [Development of a mathematical model of the sys-

- tem high-temperature ceramic heat exchangers periodic action]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 3, pp. 26–35. In Russ.
3. **Pelevin F.V., Ponomarev A.V., Semenov P.Yu.** K voprosu o primeneniі poristykh metallov v regenerativnoy sisteme okhlazhdeniya zhidkostnykh raketnykh dvigatelej [On the application of porous metals in the regenerative cooling system of liquid propellant engines]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie – Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2014, no. 5, pp. 10–19. In Russ.
  4. **Alexandrov V.Yu., Siluyanova M.V., Frentuzov M.S., Koroleva A.P.** Issledovanie protsessov nagreva i okhlazhdeniya podogrevatelya preryvnogo dejstviya s sharovoj zasypkoj dlya aviadvigatlej [Investigation in heating and cooling processes of the discontinuous pebble bed heater for aircraft engines]. *Aviatsionnaya promyshlennost' – Aviation industry*, 2018, no. 1, pp. 14–20. In Russ.
  5. **Mosina E.V.** Numerical study of flow at a liquid-porous medium interface. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2010, vol. 44, no. 5, pp. 679–685.
  6. **Sorokin V.V.** *Gidravlika i teploobmen sharovykh zasypok v usloviyakh aktivnoy zony vodo-vodyanykh yadernykh reaktorov s mikrotvelami* [Hydraulics and heat transfer of ball fillings in terms of active zone of water-water nuclear reactors with micro fuel compacts]. Minsk: Belarusskaya navuka, 2010. 191 p. In Russ.
  7. **Lozovatsky V.V., Pelevin F.V., Ponomarev A.V.** Soprotivlenie i teploobmen v sharovykh zasypkakh pri dvizhenii odno- i dvukhfaznykh sred i kipenii [Resistance and heat transfer in ball bed when moving one – and two-phase media and the boiling]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie – Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2006, no. 7, pp. 32–41. In Russ.
  8. **Bogoyavlenskiy R.G.** *Gidrodinamika i teploobmen v vysokotemperaturnykh yadernykh reaktorakh s sharovymi tvelami* [Hydrodynamics and heat transfer in high temperature nuclear reactors with spherical fuel elements]. Moscow: Atomizdat, 1978. 112 p. (Technique of nuclear reactors № 4). In Russ.
  9. **Smorchkova Y.V., Avdonina, E.A., Dedov A.V.** Issledovanie teplogidravlicheskiykh i nejtronno-fizicheskikh kharakteristik perspektivnykh teplovydelyayushchikh sborok dlya reaktornykh ustanovok maloj moshhnosti [Investigation of thermohydraulic and neutron-physical characteristics of perspective fuel assembly for low-power reactor facility]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Problemy ehnergetiki – Power engineering: research, equipment, technology*, 2018, vol. 20, no. 7–8, pp. 23–34. In Russ.
  10. **Garipov A.A., Konstantinov S.Yu., Tuk D.E., Tselishchev D.V.** Chislennoe modelirovanie techeniya v fil'tre [Computational fluid flow modeling in filter]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Ufa State Aviation Technical University*, 2013, vol. 17, no. 3, pp. 153–158. In Russ.
  11. **Ruiz G., Ripoll N., Zbogor-Rasic A.** Experimental and numerical analysis of the heat transfer in packed bed exposed to the high thermal radiation flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, vol. 136, pp. 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.009>
  12. **Wu H., Gui N., Yang X.** Numerical simulation of heat transfer in packed pebble beds: CFD-DEM coupled with particle thermal radiation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, vol. 110, pp. 393–405. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.03.035>
  13. **Cascetta M., Cau G., Puddu P., Serra F.** A comparison between CFD simulation and experimental investigation of a packed-bed thermal energy storage system. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 98, pp. 1263–1272. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.019>
  14. **Wu M., Li M., Xu C., He Y., Tao W.** The impact of concrete structure on the thermal performance of the dual-media thermocline thermal storage tank using concrete as the solid medium. *Appl. Energy*, 2014; vol. 113, pp. 1363–1371. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.044>
  15. **Ansys 19.0** Documentation. – Houston: Swanson Analysis Systems, Inc., 2005.
  16. **Aerov M.E., Todes O.M.** *Gidravlicheskie i teplovye osnovy raboty apparatov so statsionarnym i kipyashhim zernistym sloem* [Hydraulic and thermal bases of work of devices with stationary and boiling granular layer]. Moscow: Chemistry, 1968. 512 p. In Russ.