

*Смирнов Николай Николаевич*,  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, e-mail: nsmirnov@bk.ru  
*Smirnov Nikolay Nikolayevich*,  
Ivanovo State Power Engineering University, Associate Professor of the Industrial Heat Power Engineering Department, e-mail: nsmirnov@bk.ru

*Тютиков Владимир Валентинович*,  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, проректор по научной работе, зав. кафедрой автоматизации технологических процессов, e-mail: tvv@ispu.ru  
*Tyutikov Vladimir Valentinovich*,  
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Vice-Rector for Scientific Work, Head of the Department of Automation of Technological Processes, e-mail: tvv@ispu.ru

УДК 532.546.3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НАСЫПНОЙ САДКИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ПОРОЗНОСТИ И СКОРОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ

Г.А. ПЕРЕВЕЗЕНЦЕВ, В.А. ГОРБУНОВ, О.Б. КОЛИБАБА  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: mkandy@mail.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Одним из эффективных способов интенсификации процессов теплообмена в насыпной садке является организация фильтрации газов через садку. Однако необходимо сопоставлять получаемый положительный эффект при уменьшении времени нагрева, а следовательно, и необходимого количества подводимой тепловой энергии, с сопротивлением насыпной садки, которое влияет на выбор оборудования. Существующие формулы для определения сопротивления слоя садки имеют ограничения к применению по ряду, как правило, структурных показателей. Таким образом, нахождение величины аэродинамического сопротивления насыпных садок различной структуры является важной задачей для определения количества энергии, затрачиваемой для организации процесса фильтрации.

**Материалы и методы.** Использованы данные, полученные в ходе экспериментального исследования процесса фильтрации флюида через пористую среду в диапазоне значений порозности. Для аппроксимации искомой зависимости использован метод нелинейного регрессионного анализа.

**Результаты.** На основе данных, полученных в ходе экспериментального исследования по сопротивлению насыпных садок с различной порозностью, выведена эмпирическая полиномиальная зависимость сопротивления насыпной садки от массового расхода флюида и величины порозности. Приведенное уравнение может быть использовано при изменении скорости фильтрации от 2 до 8 м/с и значений порозности от 0,345 до 0,888 независимо от структурных показателей слоя садки. Проведено математическое моделирование процесса фильтрации воздуха через садку при замене реальной структуры фракталоподобной моделью.

**Выводы.** Полученные результаты позволяют оптимизировать режимные параметры работы оборудования в термических нагревательных печах, также представленная зависимость может быть использована для определения аэродинамического сопротивления насыпных садок, влияющего на выбор тягодутьевого оборудования при реконструкции печей. Достоверность полученных результатов определяется погрешностью проведенного эксперимента, составляющей не более 7 %.

**Ключевые слова:** аэродинамическое сопротивление, порозность, насыпная садка, фрактал, математическое моделирование, фильтрация флюида

## ESTIMATION OF THE DEPENDENCE OF AERODYNAMIC RESISTANCE OF THE BULK TANK ON POROSITY AND RATE OF FILTRATION

G.A. PEREVEZENTSEV, V.A. GORBUNOV, O.B. KOLIBABA  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: mkandy@mail.ru

### Abstract

**Background.** One of the effective ways to intensify heat exchange processes in the bulk tank is organization of gas filtration through the tank. However, it is necessary to compare the positive effect obtained by reducing the heating time and, hence, the required amount of heat input with the resistance of the bulk tank, which affects the choice of equipment. The existing formulas for determining tank layer resistance, as a rule, have a limited application range due to a number of structural parameters. Thus, obtaining the value of the aerodynamic resistance of bulk tanks of different structures is an important task for determining the amount of energy consumed for the organization of the filtration process.

**Materials and methods.** The work employed the data obtained in the experimental study of fluid filtration through a porous medium in the range of porosity values. The method of nonlinear regression analysis was used to approximate the desired dependence.

**Results.** Based on the data on the resistance of bulk tanks of different porosity obtained in the experimental study, the authors have derived an empirical polynomial dependence of the resistance of bulk tanks on the fluid mass flow rate and porosity. This equation can be applied for the filtration rate values from 2 to 8 m/s and porosity values from 0,345 to 0,888 regardless of the structural parameters of the bulk tank layer. The authors carried out mathematical modeling of the air filtration process through the tank by replacing the real structure with a fractal-like model.

**Conclusions.** The obtained results allow optimizing the operating parameters of the equipment in thermal heating furnaces, and the presented dependence can be used to determine the aerodynamic resistance of bulk tanks, affecting the choice of traction equipment in the reconstruction of furnaces. The accuracy of the obtained results is determined by the experiment error, which does not exceed 7 %.

**Key words:** aerodynamic resistance, porosity, bulk tank, fractal, mathematical modeling, fluid filtration

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2019.2.016-024

**Введение.** Энергоэффективность и энергосбережение входят в число стратегических направлений приоритетного технологического развития страны. Основным звеном металлообрабатывающей, машиностроительной и других отраслей промышленности являются нагревательные и термические печи. Для улучшения структуры и придания заданных свойств (прочности, твердости, износоустойчивости и т. п.), необходимых для конкретных данных условий производства, осуществляется термическая обработка металлов.

В термические нагревательные печи заготовки помещаются в виде хаотично расположенных элементов. Часто массив нагреваемых в печи заготовок представляет собой насыпные структуры, называемые насыпными садками, которые, в свою очередь, являются пористой структурой, а само понятие пористости определяется как доля объема пор в общем объеме пористого тела [7].

Одним из эффективных способов интенсификации процессов теплообмена в насыпной садке является организация фильтрации газов через садку [1]. Проникновение греющих газов между изделиями обеспечивает более быстрый и равномерный их прогрев и приводит в конечном итоге к снижению времени пребывания заготовок в печи. Однако необходимо сопоставлять получаемый положительный эффект при уменьшении времени нагрева, а следовательно, и необходимого количества подводимой тепловой энергии, с сопротивлением насыпной садки, которое влияет на выбор дутьевого оборудования. Таким образом, актуальной является проблема определения величины аэродинамического сопротивления насыпной садки.

Наиболее общим уравнением, описывающим фильтрацию флюида через пористую среду, является дифференциальная форма закона Дарси [3], описывающая процесс фильтрации жидкостей и газов в пористой среде. Имеются доказательства

решения этого уравнения для пористых сред с периодической микроструктурой, полученные Л.Е. Леонтьевым [4], а также Н.С. Бахваловым [5], а для среды со случайной микроструктурой – А.Ю. Беляевым [6].

Однако универсальная формула, позволяющая выполнить расчет гидравлического сопротивления сыпучих материалов, в настоящее время отсутствует. Так, например, Хейлигенштедт [2] приводит формулу для расчета потери давления в слое материала, состоящего из равномерно расположенных зерен:

$$h_{\text{пот}} = n \rho w^{1,9}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность фильтрующей среды, кг/м<sup>3</sup>;  $w$  – скорость фильтрующей среды, м/с;  $n$  – константа для зерен:  $n = 11$  (для 60±10 мм),  $n = 14-18$  (для 45±5 мм),  $n = 28$  (для 35±5 мм),  $n = 55$  (для 25±5 мм).

Н.Н. Жаворонков<sup>1</sup> для сопротивления слоя кусковых материалов предлагает следующую формулу:

$$h_{\text{пот}} = \frac{7,6 \cdot \rho w^{0,8} v^{0,2} H}{g d_{\text{гидр}} f^{1,8}}, \quad (2)$$

где  $H$  – высота насыпного слоя, м;  $w$  – скорость среды, отнесенная к полному сечению канала, м/с;  $d_{\text{гидр}}$  – гидравлический диаметр канала, м;  $f$  – значение порозности слоя.

Гидравлический диаметр канала определяется по формуле

$$d_{\text{гидр}} = \frac{2}{3} \cdot d_{\text{экв}} \frac{f}{1-f}. \quad (3)$$

Широкое распространение при расчете сопротивления слоя получила формула, аналогичная формуле потери напора на трение<sup>1</sup>:

$$h_{\text{пот}} = \xi \frac{\rho \omega}{2 \cdot g} \frac{H}{d_{\text{экв}}}, \quad (4)$$

где  $\xi$  – коэффициент сопротивления, определяемый по номограмме в зависимости от  $Re_{\text{усл}}$  для различных типов засыпаемых материалов;  $\omega$  – условная скорость движения, отнесенная к полному сечению канала, м/с;  $d_{\text{экв}}$  – средневзвешенный размер куска, м;  $H$  – высота насыпного слоя, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Уравнение фильтрации с предельным градиентом в анизотропных средах приводят в своей работе Н.М. Дмитриев, М.Т. Мамедов [13]. В ней решается система уравнений фильтрационных течений с предельным градиентом в векторном виде.

Решение вопроса фильтрации флюидов в пористых средах методом математического моделирования представлено в работе Н. Равшанова, Н.М. Курбонова [10], которые предлагают решение системы нелинейных дифференциальных уравнений с помощью метода выпрямления фазовых фронтов. В работе А.В. Сухина и Л.А. Григоряна [11] численное моделирование процесса фильтрации предлагается производить при помощи модифицированного адаптивного метода минимальных поправок. Г.В. Голубев рассматривает математическую модель фильтрации в неоднородных трещиновато-пористых средах, представляющих собой совокупность пористых блоков, отделенных друг от друга развитой системой пор [12].

Вышеприведенные методы поиска параметров работы при фильтрации флюида через садку являются итерационными и, как правило, требуют специального программного обеспечения.

Решение вопроса поиска величины сопротивления насыпной садки в условиях производства требует наличия универсальной формулы, применимой в широком диапазоне значений порозности и скорости фильтрации, с помощью которой можно с достаточной степенью точности определить величину аэродинамического сопротивления пористых структур.

Целью исследования является экспериментальное определение сопротивления насыпной садки при различном значении порозности и получение зависимости величины сопротивления садки от величины порозности и скорости фильтрации.

В задачу исследования входило экспериментальное определение величины сопротивления насыпной садки в заданном диапазоне значений порозности и скорости фильтрации флюида, подбор типа зависимости и последующее получение искомого уравнения.

**Материалы и методы.** Имеющиеся приближенные формулы могут быть использованы только в случаях, близких к проведенным опытам, в которых характер-

<sup>1</sup> Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Металлургия, 1975.

ными принимаются определенные типоразмеры элементов. Для определения аэродинамического сопротивления садок с различной порозностью было проведено экспериментальное исследование, целью которого являлось определение аэродинамического сопротивления насыпной садки в широком диапазоне значений порозности и скорости фильтрации.

В качестве исследуемых были выбраны 3 типа насыпных садок. Насыпные садки формировались из следующих конструктивных элементов:

– первый тип: кольца «Рашига» с наружным диаметром  $d_{к1} = 22$  мм, длиной цилиндра  $l_k = 20$  мм; материал изготовления элемента Сталь 40Х, средняя масса одного элемента 0,05 кг;

– первый тип: кольца «Рашига» с наружным диаметром  $d_{к2} = 32$  мм, длиной цилиндра  $l_k = 20$  мм; материал изготовления элемента Сталь 40Х, средняя масса одного элемента 0,021 кг;

– второй тип: короткие стальные цилиндры  $d_{цпл} = 16$  мм и  $l_{цпл} = 30$  мм, материал изготовления элемента Сталь 40Х, средняя масса одного элемента 0,031 кг;

– третий тип: самонарезающиеся шурупы  $l_{ш} = 50$  мм и  $d_{ш} = 3,5$  мм, материал изготовления элемента Сталь 40Х, средняя масса одного элемента 0,002 кг.

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки.

Перед подачей воздуха в контейнер 8 засыпалась садка, сформированная из

элементов одного типа, описанных выше. Процесс исследования был поделен на четыре этапа. В процессе каждого этапа экспериментального исследования производились отбор элементов, засыпка в контейнер, подача воздуха, измерение полученных параметров. На каждом последующем этапе производилась засыпка новых элементов и исследование повторялось. На первом этапе засыпались элементы первого типа – кольца «Рашига» с  $d_{к2} = 32$  мм, величина порозности садки, сформированной этими элементами, составляла 0,843–0,836. На втором этапе засыпались элементы первого типа – кольца «Рашига» с  $d_{к1} = 22$  мм, величина порозности садки, сформированной этими элементами, составляла 0,773. В третий этап производилась засыпка элементов второго типа – короткие цилиндры, величина порозности садки, сформированной этими элементами, составляла 0,345–0,485.

На четвертом этапе садка формировалась из элементов третьего типа – самонарезающихся шурупов, значение порозности сформированной садки составляло 0,881–0,888. Засыпка садки в контейнер производилась хаотично, специальная компоновка элементов садки не рассматривалась, предполагалось, что все конструктивные элементы, входящие в состав садки, располагаются в контейнере равномерно, заполняя весь рабочий объем в контейнере.

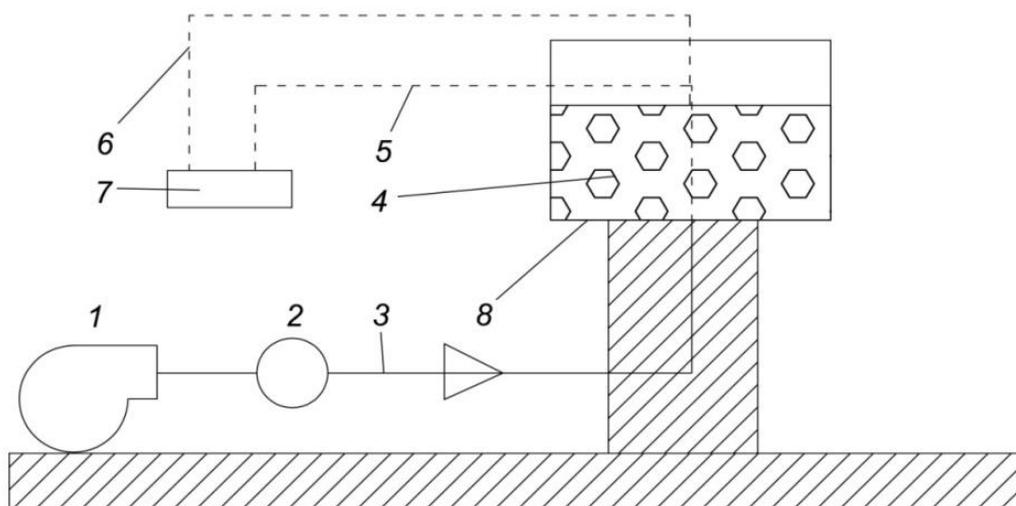


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – дутьевой вентилятор; 2 – цифровой дифманометр ДМЦ 01М; 3 – воздуховод; 4 – насыпная садка; 5 – трубка для измерения давления на входе в контейнер; 6 – трубка для измерения давления на выходе из контейнера; 7 – аналоговый модуль МВА-4; 8 – контейнер

Для простоты определения поверхности пор предполагается, что каждый элемент садки имеет одну точку контакта с соседним элементом, что следует из предположения о равномерном распределении элементов, формирующих насыпную садку. Перед засыпкой в контейнер определялись вес и состав насыпной садки, и далее, исходя из занимаемого объема, а также объема засыпаемых элементов, определялась величина порозности исследуемого слоя:

$$f = \frac{V_{\text{пор}}}{V_0}, \quad (5)$$

где  $V_{\text{пор}}$  – объем пор,  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{тела}}$  – объем, занимаемый насыпной садкой в контейнере,  $\text{м}^3$ .

Высота насыпного слоя при засыпках оставалась постоянной, варьирование величины порозности осуществлялось при помощи изменения структурного состава исследуемого слоя садки варьированием количества элементов большего и меньшего размера.

В ходе эксперимента по воздуховоду 3, выполненному из гладкой пластиковой трубы диаметром  $d_b = 0,4$  м, при помощи дутьевого вентилятора 1 подается с заданной постоянной скоростью воздух

для фильтрации через слой насыпной садки. Регулирование диапазона скорости фильтрации изменялось в пределах от 2 до 8 м/с. Сопротивлением воздуховода в ходе проведения эксперимента было решено пренебречь, так как оно практически не влияло на значение скорости дутья, измеренное на входе в контейнер. Измерение скорости воздушного потока производилось при помощи зонда, помещенного ориентировано на центр воздушного потока в специальное отверстие (точка 2), сигнал с зонда передавался и обрабатывался на дифманометре ДМЦ-01М. Сопротивление потока воздуха в пристеночном слое не учитывалось. Величина падения давления находилась в виде разницы показаний давления на входе в камеру и на выходе из слоя.

**Результаты исследования.** В результате проведенного исследования были получены группы кривых, показывающих изменение сопротивления насыпной садки, сформированной различными элементами. Графическое отображение полученных результатов для каждого из типов исследуемых насыпных садок представлено на рис. 2.

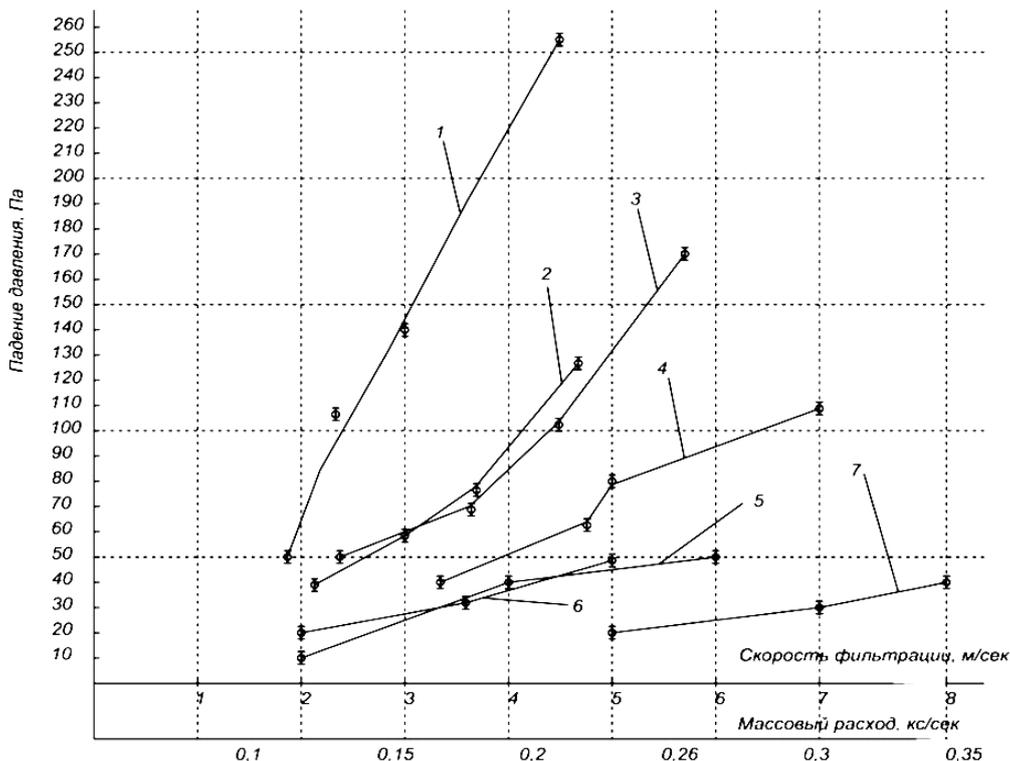


Рис. 2. Сопротивление садок с величиной порозности: 1 –  $f = 0,345$ ; 2 –  $f = 0,485$ ; 3 –  $f = 0,733$ ; 4 –  $f = 0,836$ ; 5 –  $f = 0,888$ ; 6 –  $f = 0,846$ ; 7 –  $f = 0,881$

Анализ графика (рис. 2) показывает, что чем выше значение порозности, тем меньше падение давления в насыпной садке, и, соответственно, чем выше насыпная плотность, тем выше сопротивление садки. Характер кривых одинаковый, что свидетельствует о верности полученных результатов.

Точность полученных в ходе проведения эксперимента данных определяется погрешностью эксперимента, состоящей из погрешности определения массы садки, погрешности определения скорости потока, погрешности определения давления на входе в контейнер, погрешности определения давления на выходе из контейнера.

Величина предельной относительной погрешности определения массы садки определяется как

$$\delta_{ПР.М} = \pm(\delta_M + \delta_{доп} + \delta_{мет}) = \pm(0,1 + 5) = \pm 5,1\%.$$

Основная относительная погрешность определения расхода воздуха определяется как

$$\begin{aligned} \delta_P &= \pm \sqrt{(\delta_{РАСХ})^2 + (\delta_{СЕК})^2} = \\ &= \pm \sqrt{1,5^2 + 0,1^2} = \pm 1,503\%. \end{aligned}$$

Величина предельной относительной погрешности определения давления воздуха определяется как

$$\delta_{ПР.Д} = \pm(\delta_D + \delta_{доп} + \delta_{мет}) = \pm(0,502 + 5) = \pm 5,502\%.$$

Значение итоговой суммарной погрешности эксперимента составляет 9,93 %.

На основе экспериментальных данных в программном комплексе CurveExpert Professional величина падения давления была аппроксимирована зависимостью  $\Delta P = f(G, f)$  с погрешностью не более 5 %, где массовый расход  $G$  изменялся в пределах 0,1–0,3 кг/с, а величина порозности  $f$  – в диапазоне 0,345 до 0,888. Коэффициент корреляции данной модели близок к 1 и составляет 0,96, что говорит о возможности применения данного уравнения при расчете аэродинамического сопротивления насыпных садок.

Полученная эмпирическая зависимость имеет вид полного кубического полинома:

$$\Delta P(G, f) = a_1 + a_2 G + a_3 f + a_4 G^2 + a_5 f^2 + a_6 G^3 + a_7 f^3 + a_8 Gf + a_9 G^2 f + a_{10} Gf^2, \quad (6)$$

где  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}$  – эмпирические коэффициенты;  $f$  – величина порозности;  $G$  – массовый расход, кг/с.

Значения используемых в уравнении эмпирических коэффициентов представлены в таблице.

#### Значения эмпирических коэффициентов

№ п/п	Коэффициент	Значение
1	2	3
1	$a_1$	1073,879
2	$a_2$	-5892,748
3	$a_3$	29,071
4	$a_4$	10234,62
5	$a_5$	17,843
6	$a_6$	-5523,144
7	$a_7$	-0,954
8	$a_8$	-111,108
9	$a_9$	31,592
10	$a_{10}$	-5,509

Графическая интерпретация зависимости величины сопротивления насыпной садки  $\Delta P = f(G, f)$  представлена на рис. 3.

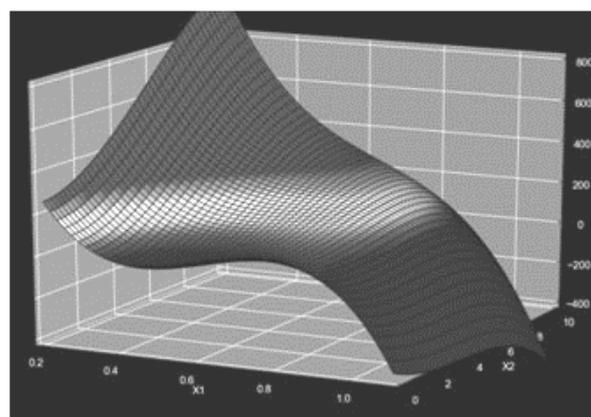


Рис. 3. Зависимость сопротивления садки  $\Delta P = f(G, f)$

В программном комплексе Ansys Fluent было проведено моделирование процесса фильтрации воздуха через насыпную садку. В качестве модели пористого тела была выбрана фракталоподобная модель, построенная на основе губки Менгера. На рис. 4 представлен общий вид построенной модели.

Уход от классической губки Менгера обусловлен габаритными размерами насыпной садки, исследуемой в ходе численного эксперимента (0,17×1,7×4 м). Объем садки –  $V_{ТВ} = 0,44039 \text{ м}^3$ , объем газового пространства –  $V_{пор} = 0,71561 \text{ м}^3$ , порозность данной модели –  $f = 0,619$ . Площадь поверхности пор составила  $53,66647 \text{ м}^2$ .

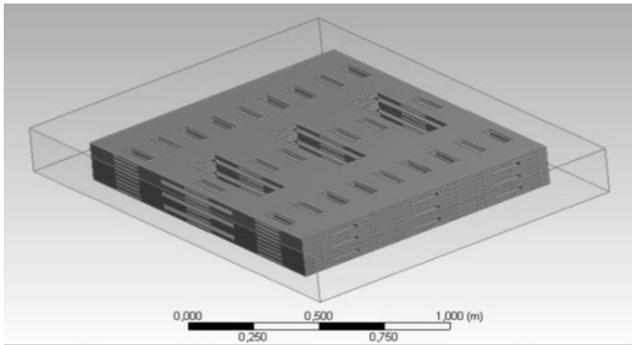


Рис. 4. Фракталоподобная модель насыпной садки

На рис. 5 представлен общий вид расчетной сетки. Количество элементов сетки – 3220840, количество расчетных узлов – 3328106.

В качестве граничных условий задана скорость потока воздуха на вводе в фрактальную структуру. На боковых стенках задается свойство непроницаемости, что соответствует закрытому контейнеру. Выход фильтрующего носителя осуществляется через верхнюю границу, на которой,

соответственно, заданы условия свободного выхода в атмосферу.

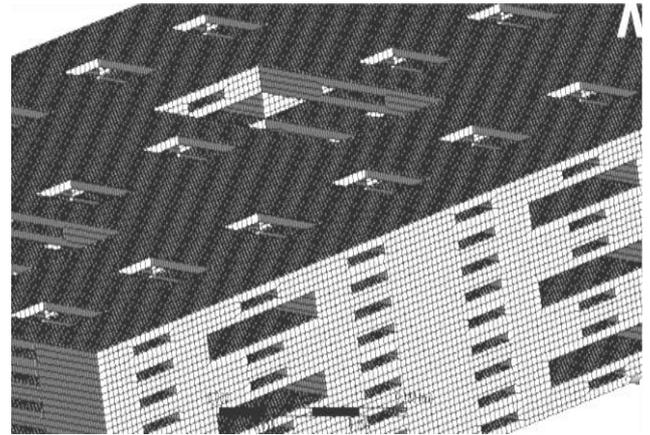


Рис. 5. Общий вид расчетной сетки

На рис. 6 показана кривая зависимости величины аэродинамического сопротивления в расчетной математической модели от скорости фильтрации.

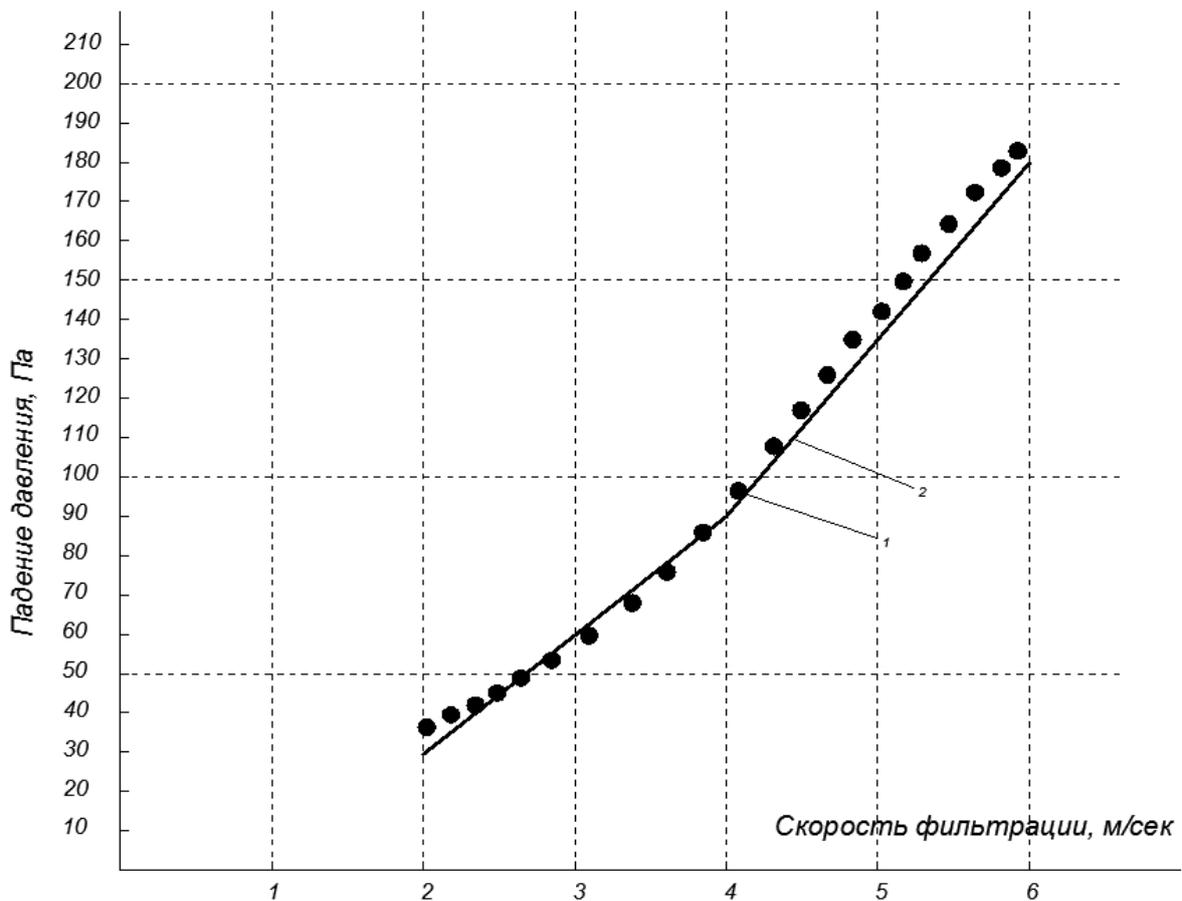


Рис. 6. График зависимости величины падения давления от скорости фильтрации для садки порозностью  $f = 0,439$ : 1 – экспериментальные значения; 2 – математическая модель

Видно хорошее совпадение кривой, отражающей изменение дифференциального давления в садке при математическом моделировании, с опытными данными. Расхождение составило не более 10 %. Характер полученных кривых одинаковый, что свидетельствует о возможности использования при математическом моделировании фрактальной модели насыпной садки и получения достоверной картины протекающих аэродинамических процессов.

**Выводы.** В ходе проведенного экспериментального исследования были получены данные по величине сопротивления насыпных садок при скоростях фильтрации в диапазоне 2–8 м/с и величиной порозности в диапазоне от 0,345 до 0,888 неструктурной компоновки. Величина погрешности экспериментальных измерений составила не более 10 %.

На основе выполненного экспериментального исследования разработана эмпирическая зависимость сопротивления насыпной садки от массового расхода флюида и насыпной порозности. Полученное уравнение имеет вид полного кубического полинома. Его можно использовать для определения величины падения давления при фильтрации теплоносителя через насыпную садку при изменении скорости фильтрации от 2 до 8 м/с и порозности 0,345 до 0,888 независимо от конструктивных параметров садки, способа компоновки элементов и т.д. Коэффициент корреляции полученного уравнения с экспериментальными данными составил 0,96, что свидетельствует о том, что с помощью полученного эмпирического уравнения с достаточной степенью точности можно найти величину аэродинамического сопротивления насыпных садок в заданном диапазоне скоростей фильтрации и порозности.

Сравнение результатов, полученных при математическом моделировании процесса фильтрации в программном комплексе Ansys Fluent, при котором реальная садка была заменена фракталоподобной моделью, построенной на основе губки Менгера, и значений, полученных с помощью найденной эмпирической зависимости, показало хорошую сходимость кривых, при этом величина погрешности не превышала 10 %.

## Список литературы

1. **Бровкин Л.А., Гусев В.А.** О краевых условиях в процессах сушки фильтрацией теплоносителя // Известия вузов. Энергетика. – 1983. – № 5. – С. 79–82.
2. **Чудновский А.Ф.** Теплофизические характеристики дисперсных материалов. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962.
3. **Леонтьев Н.Е.** Основы теории фильтрации. – М.: Изд-во ЦПИ при механико-математическом факультете МГУ, 2009. – С. 24–29.
4. **Санчес-Паленсия Э.** Неоднородные среды и теория колебаний / пер. с англ. под ред. О.А. Олейник. – М.: Мир, 1984. – С. 176.
5. **Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П.** Осреднение процессов в периодических средах. – М.: Наука, 1984. – С. 164–169.
6. **Беляев А.Ю.** Усреднение в задачах теории фильтрации. – М.: Наука, 2004. – С. 76–127.
7. **Пористость** // Малый энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона: в 4 т. – СПб., 1907–1909.
8. **Перевезенцев Г.А., Колибаба О.Б., Горбунов В.А.** Экспериментальное исследование влияния дутья на температурное поле при нагреве пористой садки в термической печи // Тезисы докл. Междунар. науч.-техн. конф. «XVIII Бенардосовские чтения». Т. 2. – Иваново, 2015. – С. 213–216.
9. **Перевезенцев Г.А., Колибаба О.Б., Горбунов В.А.** Экспериментальное исследование влияния фильтрации на температурное поле насыпной садки // Вестник ИГЭУ. – 2015. – № 5. – С. 37–41.
10. **Равшанов Н., Курбонов Н.М.** Компьютерное моделирование процесса фильтрации флюидов в пористых средах // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2015. – Т. 4, № 2. – С. 89–104.
11. **Сухинов А.И., Григорян Л.А., Сухинов А.А.** Математическое моделирование фильтрации двухфазной жидкости на основе модифицированного адаптивного метода минимальных поправок // Вестник Донского государственного технического университета. – 2016. – № 3(86). – С. 96–109.
12. **Голубев Г.В.** Математическое моделирование фильтрации в неоднородных трещиновато-пористых средах // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4(3). – С. 725–727.
13. **Дмитриев Н.М., Мамедов М.Т., Максимов В.М.** Фильтрация с предельным градиентом в анизотропных средах. Теория и эксперимент // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4(3). – С. 749–750.

## References

1. Brovkin, L.A., Gusev, V.A. O kraevykh usloviyakh v protsessakh sushki fil'tratsiy teplonositelya [On boundary conditions in drying processes through heat carrier filtration]. *Izvestiya vuzov. Energetika*, 1983, no. 5, pp. 79–82.
2. Chudnovskiy, A.F. *Teplofizicheskie kharakteristiki dispersnykh materialov* [Thermophysical characteristics of disperse materials]. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury, 1962.
3. Leont'ev, N.E. *Osnovy teorii fil'tratsii* [Fundamentals of filtration theory]. Moscow: Izdatel'stvo TsPI pri mekhaniko-matematicheskom fakul'tete MGU, 2009, pp. 24–29.
4. Sanches-Palensiya, E. *Neodnorodnye sredy i teoriya kolebaniy* [Heterogeneous media and the theory of vibrations]. Moscow: Mir, 1984, pp. 176.
5. Bakhvalov, N.S., Panasenko, G.P. *Osrednenie protsessov v periodicheskikh sredakh* [Averaging of processes in periodic media]. Moscow: Nauka, 1984, pp. 164–169.
6. Belyaev, A.Yu. *Usrednenie v zadachakh teorii fil'tratsii* [Averaging in filtration theory problems]. Moscow: Nauka, 2004, pp. 76–127.
7. *Poristost'. Malyy entsiklopedicheskiy slovar' Brokgauza i Efrona v 4 t.* [Porosity. Brockhaus and Efron's Small Encyclopedic Dictionary]. Saint-Petersburg, 1907–1909.
8. Perevezentsev, G.A., Kolibaba, O.B., Gorbunov, V.A. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya dut'ya na temperaturnoe pole pri nagreve poristoy sadki v termicheskoy pechi [An experimental study of draught effect on the temperature field during porous tank heating in a heating furnace]. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «XVIII Benardosovskie chteniya». T. 2* [Abstracts of the International Scientific and Technical Conference «The XVIII Benardos Readings»]. Ivanovo, 2015, pp. 213–216.
9. Perevezentsev, G.A., Kolibaba, O.B., Gorbunov, V.A. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya fil'tratsii na temperaturnoe pole nasypnoy sadki [An experimental study of filtration effect on the bulk tank temperature field]. *Vestnik IGEU*, 2015, no. 5, pp. 37–41.
10. Ravshanov, N., Kurbonov, N.M. Komp'yuternoe modelirovanie protsessov fil'tratsii flyuidov v poristyykh sredakh [Computer modelling of fluid filtration in porous media]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, vol. 4, no. 2, pp. 89–104.
11. Sukhinov, A.I., Grigoryan, L.A., Sukhinov, A.A. Matematicheskoe modelirovanie fil'tratsii dvukhfaznoy zhidkosti na osnove modifitsirovannogo adaptivnogo metoda minimal'nykh popravok [Mathematical modelling of filtration of a two-phase liquid based on a modification of the adaptive minimum correction method]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 3(86), pp. 96–109.
12. Golubev, G.V. Matematicheskoe modelirovanie fil'tratsii v neodnorodnykh treshchinovato-poristyykh sredakh [Mathematical modelling of filtration in heterogeneous fractured-porous media]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*, 2011, no. 4(3), pp. 725–727.
13. Dmitriev, N.M., Mamedov, M.T., Maksimov, V.M. Fil'tratsiya s predel'nyim gradientom v anizotropnykh sredakh. Teoriya i eksperiment [Filtration with a limiting gradient in anisotropic media. Theory and experiment]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*, 2011, no. 4(3), pp. 749–750.

*Перевезенцев Григорий Александрович*,  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант,  
e-mail: mkandy@mail.ru  
*Perevezentsev Grigory Aleksandrovich*,  
Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate student, e-mail: mkandy@mail.ru

*КолИБАБА Ольга Борисовна*,  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры энергетика теплотехнологий и газоснабжения, e-mail: koli-baba@mail.ru  
*Kolibaba Olga Borisovna*,  
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Thermal Technology and Gas Supply, e-mail: koli-baba@mail.ru

*Горбунов Владимир Александрович*,  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, доцент кафедры атомных электрических станций, e-mail: gorbynov.w@mail.ru  
*Gorbunov Vladimir Aleksandrovich*,  
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Associate Professor of the Nuclear Power Plants Department, e-mail: gorbynov.w@mail.ru