

УДК 621.1:662

## ИССЛЕДОВАНИЕ СЕТОЧНОЙ НЕЗАВИСИМОСТИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ

**М. И. Ершов<sup>1</sup>, М. А. Горский<sup>2</sup>, В. Г. Тупоногов<sup>3</sup>, Н. А. Абаймов<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup> Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>1</sup> ershov1807@gmail.com

**Аннотация.** В работе изложены результаты расчетов псевдоожигенного слоя в эйлеровой постановке на трехмерных неструктурированных сетках из полиэдрических элементов с различным уровнем подробности и на одной двумерной структурированной гексаэдрической сетке с уровнем подробности, сопоставимым с самой подробной трехмерной сеткой. Представлены график давления для центральной точки слоя и параметры, связанные с зарождением и выходом пузырей. Выявлена разница между 2D- и 3D-моделированием слоя.

**Ключевые слова:** псевдоожигенный слой, модель EMMS, сеточная независимость, эйлерова постановка

## INVESTIGATION OF MESH INDEPENDENCE WHEN MODELING FLUIDIZED BED

**M. I. Ershov<sup>1</sup>, M. A. Gorsky<sup>2</sup>, V. G. Tuponogov<sup>3</sup>, N. A. Abaimov<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3,4</sup> Ural Federal University named after the First  
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>1</sup> ershov1807@gmail.com

**Abstract.** The study contains the results of calculations of a fluidized bed in the Euler formulation on 3D-unstructured meshes of polyhedral elements with different cell sizes and one 2D-structured hexahedral mesh with the cell size comparable to the most detailed 3D-mesh. Pressure plot for central point of the layer and parameters related to the birth and passage of bubbles are presented. The difference between 2D- and 3D-fluidized bed modeling was revealed.

**Keywords:** fluidized bed, EMMS model, mesh independence, Euler formulation

В ходе решения была воссоздана модель экспериментальной установки Дж. Дэвидсона и К. Бойса [1]. Установка представляет собой цилиндр диаметром 0,05 м и высотой 0,7 м (рис. 1, а). Под днище подавался воздух с постоянной плотностью  $1,225 \text{ кг/м}^3$  со скоростью в сечении днища 0,563 м/с. В моделировании на основе сплошных сред использовались сферические частицы с диаметром 1,2 мм. Плотность частиц —  $960 \text{ кг/м}^3$ . Высота слоя до начала псевдооживления 156 мм.

При моделировании использовалась модель аэродинамического сопротивления EMMS, встроенная в Ansys Fluent 2020 R2 [2]. Поток моделировался ламинарным, на стенках для обеих фаз было задано условие непроскальзывания (No Slip).

Сопряжение скоростей и давления потока осуществлялось по схеме SIMPLE. Градиент дискретизируется с помощью схемы Least Squares Cell Based, давление — с помощью схемы PRESTO, а импульс, объемная доля и нестационарное слагаемое дискретизируются с помощью схемы First Order. Временной шаг составляет 0,001 с, коэффициенты нижней релаксации брались по умолчанию. Моделировалось 1,5 с потока. Наиболее подробные сетки 2D и 3D, а также порозность слоя (объемная доля воздуха) в конце моделирования представлены на рис. 1, б–г.

В расчете использовалось пять различных сеток, четыре из которых — 3D (Fluent Meshing), одна — 2D из Ansys Meshing (таблица). Для сравнения расчета на различных сетках использовались параметры динамики пузырей, приведенные в таблице. Последние три строки обозначают количество пропущенных пузырей через соответствующие точки. Высота нижней точки — 6,75 мм, средней — 83,25 мм, верхней — 159,75 мм [1].

Из таблицы видно, что для 3D-случаев сеточная независимость достигается при размере ячейки 1,0–1,2 мм. Стоит заметить, что независимо от подробности сетки количество образованных пузырей на входе неизменно. Случай 2D, несмотря на те же размеры ячеек, что у самого подробного случая в 3D, отличается от последнего по количеству зарожденных и прошедших по центру пузырей.

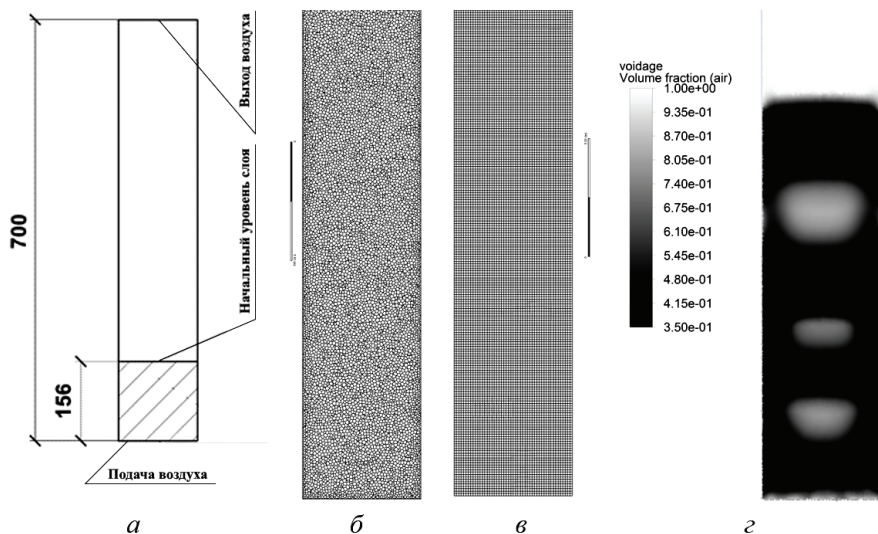


Рис. 1. Центральное сечение модели:

*a* — схема установки; *б* — полиэдрическая сетка (3D), 1 млн ячеек;  
*в* — гексаэдрическая сетка (2D); *г* — порозность в момент времени 1,5 с

Таблица

Данные о динамике пузырей для различных сеток

№ случая	1	2	3	4	5
Размер ячейки, мм	3,5–4,5	2,0–2,5	1,3–1,6	1,0–1,2	1,0
Размерность	3D	3D	3D	3D	2D
Число ячеек	36000	158000	500000	1000000	35000
Min качество по ортогональности	0,6	0,6	0,6	0,6	1,0
Время расчета (64 ядра)	2,5 ч	10 ч	1,5 дня	3 дня	2 ч
Время зарождения первого пузыря, с	0,08	0,075	0,065	0,065	0,065
Пузыри (низ), шт.	9	9	9	9	8
Пузыри (середина), шт.	7	6	6	6	4
Пузыри (верх), шт.	5	4	3	3	3

Нагляднее сеточная независимость показана на рис. 2, на котором изображены пульсации давления (Static Pressure) в средней точке (вы-

сота 83,25 мм). Видно, что при увеличении детализации сетки график приближается к наиболее подробному случаю 4. Результаты на двумерной сетке (случай 5) подобны эталонному случаю 4 лишь на отрезке времени до одной секунды. Далее при развитии псевдооживления отмечается сдвиг колебаний по фазе.

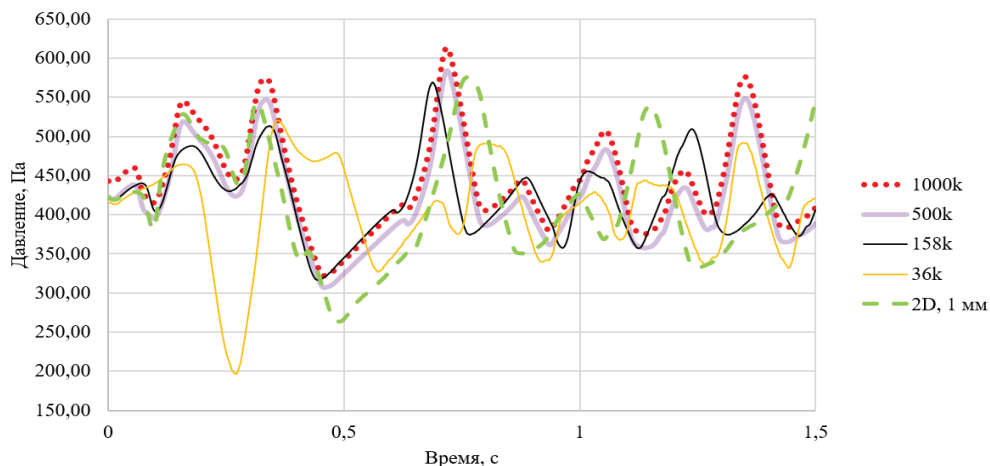


Рис. 2. Колебания давления в центральной точке слоя

Отличие результатов в 2D и 3D исследователи объясняют несколькими факторами: во-первых, в трехмерном слое лучше учитываются силы и напряжения из-за учета большего количества частиц и пространства [3]; во-вторых, в двумерном слое нельзя точно смоделировать влияние всех стенок [4]. Тем не менее, многие исследователи используют 2D-постановку для проведения качественного анализа влияния различных конструкций и условий из-за высокой скорости расчетов [3; 4].

### Список источников

1. The origin of pressure oscillations in slugging fluidized beds: Comparison of experimental results from magnetic resonance imaging with a discrete element model [Electronic resource] / C. M. Boyce [et al.] // *Chemical Engineering Science*. 2014. Vol. 116. P. 611–622. DOI: 10.1016/j.ces.2014.05.041 (date of access: 26.11.2020).
2. CAE-система ANSYS [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ansys.com/> (дата обращения: 26.11.2020).

3. Gujjula R. K. Hydrodynamic study of gas-solid flow in an internally circulating fluidized bed (ICFB) using experimental and CFD techniques: PhD Thesis. Indian Institute of Technology Hyderabad, 2014. 216 p.

4. Shi H., Komrakova A., Nikrityuk P. Fluidized beds modeling: Validation of 2D and 3D simulations against experiments [Electronic resource] // Powder Technology. 2019. Vol. 343. P. 479–494. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.11.043 (date of access: 26.112020).