

Фецов С. С.
S. S. Fetsov

О МОДЕЛИРОВАНИИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПОРИСТЫХ САМОРАЗОГРЕВАЮЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ОБЪЁМОВ

ON SIMULATION OF POROUS SELF-HEATING OBJECT UNSTATIONARY COOLING BY THE FINITE VOLUME METHOD

Фецов Сергей Сергеевич – младший научный сотрудник Лаборатории механики жидкости и газа ИАПУ ДВО РАН, ассистент Отделения машиностроения, морской техники и транспорта Политехнического института ДВФУ (Россия, Владивосток); тел. +7(984)149-33-80. E-mail: fetc95@mail.ru.

Sergey S. Fetsov – Junior Researcher, Laboratory of Fluid and Gas Mechanics of the IACP FEB RAS, Assistant of the Department of Mechanical Engineering, Marine Engineering and Transport, Polytechnic Institute of FEFU (Russia, Vladivostok); tel. +7(984)149-33-80. E-mail: fetc95@mail.ru.

Аннотация. Для расчёта нестационарных течений газа через пористые объекты с источниками саморазогрева разработана численная модель на основе метода конечных объёмов. Модель реализована с использованием пакета OpenFOAM. Тестовые результаты расчётов совпадают с высокой точностью как с аналитическим и численно-аналитическим решениями для стационарных задач, так и с результатами разработанной ранее конечно-разностной численной модели. При этом новая численная модель показывает значительно более высокое быстродействие, а также позволяет без особых затруднений решать задачи на неравномерных и неструктурированных сетках.

Summary. A computational model based on finite volume method is developed for simulation of unstationary gas flows through porous objects with self-heating sources and is implemented in OpenFOAM package. Preliminary computational results coincide with high accuracy both with analytical and numerical-analytical solutions for stationary problems and with results of previously developed finite-difference numerical model. Herewith the new numerical model demonstrates significantly more high performance and allows solving problems on non-uniform and unstructured meshes.

Ключевые слова: метод конечных объёмов, пористые среды, энерговыделение.

Key words: finite volume method, porous media, energy release.

УДК 621.735

Мотивацией для представляемой работы послужила необходимость совершенствования расчётных моделей, используемых для исследования нестационарных течений газа с источниками внутреннего саморазогрева [5], гетерогенного горения пористых сред [1; 9], газификации комбинированного заряда низкотемпературного газогенератора [3], накопителей тепловой энергии на основе гранулированных материалов с фазовыми переходами [2] и процессов извлечения редких металлов из металлосодержащих систем методом фильтрационного горения [6]. Перечисленные процессы происходят в пористых и зернистых средах, которые встречаются и в других приложениях [8]. Для указанных задач ранее были разработаны оригинальные численные модели на основе метода конечных разностей, адекватность и применимость которых продемонстрирована соответствием результатов расчётов аналитическим и численно-аналитическим решениям и экспериментальным данным. Разработанные алгоритмы показывают хорошее быстродействие, особенно при расчёте объектов относительно больших размеров при относительно высоких скоростях движения газа или когда достаточно использования относительно грубых сеток. Некоторые классы задач могут быть решены предложенными методами на персональном компьютере за несколько минут. Однако из-за достаточно строгих ограничений на шаг по времени эффективность этих ал-

горитмов оказывается недостаточной при сгущении сеток, особенно при расчёте процессов в условиях естественной конвекции. Эти проблемы частично решаются применением суперкомпьютерных технологий, в том числе параллельного программирования.

В настоящем исследовании разработан алгоритм на основе метода конечных объёмов для моделирования нестационарных процессов газового охлаждения пористых саморазогревающихся объектов. Из особенностей разработанного алгоритма в сравнении с конечно-разностным алгоритмом [5] можно назвать следующие:

1. Решаются уравнения модели [5] в консервативной форме, а аппроксимирующие разностные уравнения получаются интегрированием уравнений модели по конечному объёму.
2. Дифференциальные уравнения модели решаются по неявной схеме каждое по отдельности относительно соответствующей функции, при этом другие искомые величины, входящие в это уравнение, полагаются известными из предыдущего шага.
3. На каждом временном слое прodelьваются итерации согласно алгоритму PIMPLE, который является комбинацией алгоритмов PISO [10] и SIMPLE [7].

Последние два пункта позволяют значительно увеличивать шаг по времени без потери точности. Разработанный алгоритм реализован в свободном пакете вычислительной гидродинамики OpenFOAM [11] и протестирован на ряде модельных задач. В табл. 1 представлены пример максимальной температуры твёрдой фазы T_{\max} для установившегося охлаждения пористого саморазогревающегося элемента в одномерном случае, которая получена из численно-аналитического решения [4], методом конечных разностей [5] и конечно-объёмным методом, а также относительные погрешности δT_{\max} и время расчёта на ЦПУ Intel Core i7-8550U с частотой 1.9 ГГц.

Таблица 1

Сравнение численно-аналитического, конечно-разностного и конечно-объёмного решений

Параметр	Численно-аналитическое решение	Конечно-разностный метод [5] на сетке 40	Конечно-разностный метод [5] на сетке 100	Конечно-объёмный метод OpenFOAM на сетке 320
T_{\max} , К	552,4	547	551	553,9
δT_{\max} , %	–	0,98	0,26	0,27
Время счёта, с	–	90	570	13

Из таблицы видно, что решение, полученное по вышеописанному алгоритму, даже на более густой сетке занимает много меньшее время, чем при использовании конечно-разностной модели, а относительная погрешность во всех случаях не превышает одного процента. При этом за счёт реализации в пакете OpenFOAM алгоритм можно использовать на неравномерных, неортогональных и неструктурированных сетках в широком классе граничных условий и конфигураций расчётной области.

Автор благодарит доктора физико-математических наук Н. А. Луценко за поддержку при выполнении настоящей работы и ценные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левин, В. А. Двумерные течения газа при гетерогенном горении твёрдых пористых сред / В. А. Левин, Н. А. Луценко // ДАН. – 2017. – Т. 476, № 1. – С. 30-34.
2. Левин, В. А. Моделирование движения газа через слой гранулированного теплоаккумулирующего материала с фазовым переходом / В. А. Левин, Н. А. Луценко, С. С. Фецов // ДАН. – 2018. – Т. 479, № 4. – С. 386-389.
3. Модель газификации твёрдого горючего в комбинированном заряде низкотемпературного газогенератора летательного аппарата / В. А. Левин, Н. А. Луценко, Е. А. Салганский, Л. С. Яновский // ДАН. – 2018. – Т. 482, № 2. – С. 150-154.

4. Луценко, Н. А. Одномерный стационарный режим фильтрации газа через слой неподвижного тепловыделяющего конденсированного материала / Н. А. Луценко // Дальневосточный математический журнал. – 2002. – Т. 3, № 1. – С. 123-130.
5. Луценко, Н. А. Численное моделирование трёхмерных нестационарных течений газа через пористые объекты с источниками энерговыделения / Н. А. Луценко // Вычислительная механика сплошных сред. – 2016. – Т. 9, № 3. – С. 331-344.
6. Луценко, Н. А. Моделирование процесса извлечения ценных металлов из металлосодержащих сред методом фильтрационного горения / Н. А. Луценко // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2020. – Т. 491, № 4. – С. 85-89.
7. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар; пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
8. Романюк, Е. В. Особенности расчёта общего перепада давления на двухслойных фильтрах для очистки воздуха / В. Е. Романюк // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № II-1 (38). – С. 61-68.
9. Borovik, K. G. On numerical modelling of gas flows through axisymmetric porous object with heterogeneous combustion sources under forced filtration / K. G. Borovik // J. Phys.: Conf. Ser. – 2019. – Vol. 1404, Article 012008.
10. Issa, R. I. Solution of the Implicitly Discretized Fluid Flow Equations by Operator-Splitting / R. I. Issa // J. Comput. Phys. – 1985. – V. 62. – P. 40-65.
11. OpenFOAM: сайт. – Режим доступа: www.openfoam.com (дата обращения: 27.01.2021).