

УДК 532.5+519.6

Суперкомпьютерное моделирование динамических процессов в адаптивных капиллярных модулях на основе пористых сетчатых материалов

Лаптев Игорь Вячеславович¹

laptev@kerc.msk.ru

Городнов Анатолий Олегович¹

kerc@elnet.msk.ru

Иванов Михаил Юрьевич^{2,3(*)}

vpk@vpk.npomash.ru

Новиков Андрей Евгеньевич²

vpk@vpk.npomash.ru

Щербаков Владлен Анатольевич²

vpk@vpk.npomash.ru

Ныриков Сергей Андреевич²

vpk@vpk.npomash.ru

¹ АО ГНЦ «Центр Келдыша», Москва, Россия² АО «ВПК «НПО машиностроения», Реутов, Россия³ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены вопросы разработки прикладной методики моделирования гидродинамических и капиллярных процессов, возникающих при функционировании адаптивных устройств на основе пористых сетчатых материалов. Приведено описание методов моделирования гидравлического сопротивления проницаемых элементов модуля, капиллярной удерживающей способности и движения элементов конструкции под действием гидродинамических сил. Представлены результаты решения тестовых задач для валидации предложенной методики с использованием суперкомпьютерных технологий.

Ключевые слова: адаптивный капиллярный модуль, пористый сетчатый материал, вычислительная гидродинамика, метод контрольных объемов, суперкомпьютерный кластер

Введение. Сетчатые конструкции находят широкое применение в аэрокосмической технике в качестве фильтров, газосепарирующих и капиллярных устройств отбора жидкости. Предложенная конструкция адаптивного капиллярного модуля может способствовать снижению остатков незабора жидкости и повысить общую эффективность летательного аппарата [1]. Однако устройства подобного вида требуют разработки подхода к математическому моделированию, учитывающему не только движение жидкости через пористый сетчатый материал (ПСМ), двухфазность течения, капиллярные эффекты, но и перемещение самой конструкции устройства под действием возникающих гидродинамических, массовых и упругих сил.

Методы и материалы; результаты. Выполнен критериальный анализ процессов в адаптивном капиллярном модуле с применением теории размерности и подобия. Получены основные безразмерные параметры, определяющие эффективность рассматриваемого устройства. Основу предложенных в работе подходов составляет известный метод VOF для моделирования двухфазных течений газа и жидкости. Рассмотрена его реализация в CFD-коде «ЛОГОС Аэро-Гидро» в изотермической постановке [2]. Гидравличе-

ское сопротивление проницаемых элементов конструкции модуля предложено моделировать с помощью комплексной методики на основе уравнения Дарси — Форхгеймера. Для определения неизвестных коэффициентов в уравнении применялось 3D-моделирование обтекания ячейки квазипериодичности ПСМ. В результате обобщения результатов расчета при различных скоростях набегающего потока найдена зависимость перепада давления от числа Рейнольдса по Армору, с помощью которой восстановлены искомые коэффициенты. Для определения капиллярной удерживающей способности элемента конструкции из ПСМ предложена методика моделирования на основе решеточных уравнений Больцмана в двухфазной постановке с учетом сил поверхностного натяжения. Сформулирован метод моделирования для описания движения модуля под действием гидродинамических сил с применением механизма деформации расчетной сетки [3]. Методика апробирована на различных тестовых задачах с использованием суперкомпьютерного кластера АО «ВПК «НПО машиностроения». Продемонстрированы примеры оптимального распределения количества процессорных ядер, позволившее выполнить вычислительные процедуры за более короткое время при существенном сокращении числа параллельно исполняемых потоков алгоритма.

Заключение. В результате выполненной работы предложена комплексная методика моделирования процессов в адаптивных капиллярных модулях с учетом динамики конструкции, капиллярных эффектов и гидравлического сопротивления. Продемонстрирована работоспособность элементов методики на задачах, допускающих ускорение процесса их решения с помощью параллельных суперкомпьютерных вычислений.

Список источников

- [1] Ivanov M.Yu., Resh G.F. Theoretical Justification of Experimental Investigation of Gravity-Capillary Method for Gas-Liquid Mixtures Intake. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1391, art. no. 012079. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1391/1/012079>
- [2] Лашкин С.В., Козелков А.С., Мелешкина Д.П., Ялозо А.В., Тарасова Н.В. Моделирование течений вязкой несжимаемой жидкости разделенным и совмещенным алгоритмом типа SIMPLE. *Математическое моделирование*, 2016, т. 28, № 6, с. 64–76.
- [3] Городнов А.О., Сидоренко Н.Ю., Иванов М.Ю. Моделирование двухфазных течений в адаптивных капиллярных модулях. *YSM-2025. Всерос. конф. молодых ученых-механиков: сб. тез.* Москва, Изд-во Московского университета, 2025, 46 с.