

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОФАЗНЫХ СИСТЕМ В ЭКСТРАКЦИОННЫХ ПРОЦЕССАХ ПЕРЕРАБОТКИ ОЯТ

*У. Ф. Алтынникова¹, А. А. Бочкарева¹, Д. А. Мастюк^{1, 2}, Д. Ф. Ганеева¹,
Е. Е. Пугасов^{1, 2}, И. Р. Макеева^{1, 2}*

¹ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

²ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», Челябинск, Россия

E-mail: altynnikovauf@vniitf.ru

При разработке технологического оборудования в различных отраслях промышленности в практику вводится создание цифровых двойников, позволяющих выбрать наиболее предпочтительные решения при разработке оборудования, значительно снизить затраты на макетирование и проведение стендовых испытаний. Для создания цифрового двойника необходим выбор комплекса моделей, достоверно описывающих процессы в разрабатываемом аппарате.

В основе существующих технологических схем переработки отработавшего ядерного топлива лежат экстракционные процессы. Экстракция – процесс разделения смеси жидких или твердых веществ с помощью избирательных растворителей (экстрагентов). Центробежный экстрактор разделен на две зоны: камеру смешения, в которой осуществляется контакт двух фаз для перехода ключевого компонента, и камеру разделения, в которой происходит разделение фаз под действием центробежной силы. Трехмерное гидродинамическое моделирование процессов, происходящих в экстракторе (массообмен между фазами, разделение фаз, распределение нерастворенного осадка, образование газовой фазы) представляет интерес для предварительной оценки и выбора наиболее предпочтительных технологических решений.

Для описания течения многокомпонентной или многофазной смеси существуют различные подходы. В промышленных приложениях зачастую используют методы Volume of Fluid (VOF) [1]. В методе VOF решается только один набор уравнений движения, энергии и турбулентности, при этом вводится специальное уравнение для отслеживания положения межфазной границы (аналог уравнения неразрывности). Значения параметров, характеризующих свойства фазы (плотность, вязкость, теплопроводность и т. п.) при переходе через межфазную поверхность «переключаются», чтобы в каждой точке пространства соответствовать той фазе, которая в этой точке находится [1]. Для аппроксимации слагаемых в общей системе уравнений движения для гидродинамических вычислений наиболее подходящим является метод конечного объема [2].

Такой подход реализован в решателях `interFoam` [3] и `multiPhaseEulerFoam` [4] свободно распространяемого программного пакета `OpenFOAM` [5], которые были выбраны для моделирования. Для решения системы уравнений движения применяется метод расщепления, реализованный в алгоритме `PIMPLE`, метод основан на разделении влияния различных слагаемых на изменение импульса в расчетной сетке [6].

Для описания процесса массоперехода химического компонента стандартный решатель был модифицирован с использованием метода, описанного в работе [7]. Метод основан на внедрении в систему уравнений метода VOF, дополнительного уравнения, отвечающего за массоперенос компонента.

В работе предложены модели, гидродинамических и массообменных процессов, позволяющие моделировать смешение фаз, массообмен через границу раздела и разделение фаз под действием центробежной силы. Данные модели могут быть использованы при построении системы компьютерных моделей для создания цифрового двойника центробежного экстрактора.

Литература

1. **Быков, Л. В.** Основы вычислительного теплообмена и гидродинамики [Текст] : учеб. пособие / Л. В. Быков, А. М. Молчанов, Д. С. Янышев. – Изд. 2-е, исправ. и доп.
2. **Ferziger, Joel H.** Computational Methods for Fluid Dynamics [Text] / Joel H. Ferziger, Milovan Perić. – Fourth Edition. – Springer Nature Switzerland, 2020. [Электронный ресурс]. – <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99693-6>.
3. [[Электронный ресурс]. – <http://www.openfoamwiki.net/index.php/interFoam>

4. Surya Kaundinya Oruganti, Implementation of cavitation models into the multiphaseEulerFoam solver. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/327692025>.
 5. [Электронный ресурс]. – <http://www.OpenFOAM.org>.
 6. **Крапошин, М. В.** Математическое моделирование сжимаемых течений с использованием гибридного метода аппроксимации конвективных потоков. – 2016. [Электронный ресурс]. – https://www.keldysh.ru/council/3/D00202403/kraposhin_diss.pdf.
 7. **Haroun, Y.** Volume of fluid method for interfacial reactive mass transfer: application to stable liquid film [Text] / Y. Haroun, D. Legendre, L. Raynal // Chem. Eng. Sci. – 2010b. – Vol. 65. – P. 2896–2909.
-