

## **Применение методов вычислительной гидродинамики при моделировании реологических свойств суспензий в процессах переработки минерального и углеводородного сырья**

**Потемкин Вадим Александрович** – аспирант кафедры Обогащения полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета.

**Хасенов Асхат Маратович** – студент кафедры Обогащения полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета.

**Потапов Сергей Дмитриевич** – студент кафедры Обогащения полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета.

*Аннотация:* В статье представлен краткий обзор основных пакетов для моделирования реологических свойств суспензий процессов переработки минеральных руд и углеводородного сырья. Рассмотрены пакеты вычислительного гидродинамического моделирования среди которых программные комплексы: COMSOL Multiphysics, ANSYS Fluent, OpenFOAM, STAR-CCM +, NeiNastran.

*Ключевые слова:* Моделирование, программное обеспечение, вычисления, гидродинамика, реология, суспензия, обогащение, углеводородное сырье, COMSOL Multiphysics, ANSYS Fluent, OpenFOAM, STAR-CCM +, NeiNastran.

В настоящее время инновационное развитие техники и технологии в области обогащения невозможно представить без применения методов вычислительной гидродинамики. Методы вычислительной гидродинамики (далее CFD от англ. Computational fluid dynamics), известны довольно давно, но ввиду сложности математического аппарата, до последнего времени широко не применялись в горно-перерабатывающей области. В настоящее время, благодаря стремительному развитию цифровых технологий CFD, постепенно, становится все более доступным инструментом для широкого круга исследователей, о чем свидетельствует рост количества научных работ по применению данных методов для исследований и разработок [1,2]. Возможность «заглянуть» внутрь

аппарата или процесса и непосредственно наблюдать за распределением сред внутри объема, возможности в широких пределах оптимизировать процесс варьируя множественные факторы все это делает программное обеспечение, реализующее методы CFD незаменимым инструментом в руках исследователя.

Программное обеспечение CFD для промышленного применения существует уже более 30 лет. Первые попытки создания программных кодов, базирующихся на методах CFD были в 70-х годах, когда профессор Брайан Сполдинг основал консалтинговую компанию Concentration, Heat&Momentum Limited (CHAM Ltd). Компанией CHAM в 1981 году был разработан один из первых коммерческих пакетов CFD под названием PHOENICS. Чуть позже компанией Fluid Dynamics International (США) был выпущен пакет FIDAP (1982 год), на основе метода конечных элементов (FEM), а CreateInc (США) выпустила программное обеспечение CFD на основе метода конечных объемов (FVM) Fluent в 1983 году. В 1980 году доктор CW (Тони) Хирт основал FlowScience (США) как филиал Национальной лаборатории Лос-Аламоса, а в 1985 году выпустил программное обеспечение для моделирования течений со свободной поверхностью, используя метод конечных объёмов - Flow-3D [2].

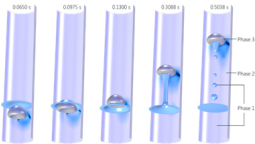
Основными особенностями первого программного обеспечения CFD были примитивный пользовательский интерфейс для ввода данных, некачественная графика и низкие вычислительные ресурсы. Эти ограничения привели к очень высоким требованиям для пользователя при моделировании геометрии и физики. Однако в начале 1990-х условия для CFD и программного обеспечения для моделирования изменились довольно быстро.

Вычислительные методы, такие как многосеточные методы, динамические сетки стали доступными для использования, а также более надежными, гибкими и широко применимыми для моделирования физических процессов. В результате появились такие новые области применения CFD как химическая и горно-перерабатывающая промышленность. Обогащение полезных ископаемых охватывает широкий спектр деятельности и многие включают сложный поток жидкости, тепло и массообмен внутри различных сред. CFD моделирование и оптимизация процессов классификации, сепарации и фильтрация позволяет с большей эффективностью и значительной экономией времени производить отладку режимов работы обогатительного оборудования и производить управляемое перераспределение потоков в зависимости от требований производства, а также моделировать реологические параметры пульп с учетом минералого-технологических свойств материала.

Обзор публикаций в области моделирования реологических свойств пульп показал, что

наибольшее распространение, среди современных решений имеют программные комплексы: COMSOL Multiphysics, ANSYS Fluent, OpenFOAM, STAR-CCM+, NeNastran. Ниже будут рассмотрены основные преимущества данных программ.

COMSOL Multiphysics — это универсальная программная платформа для моделирования различных физических процессов. [1]. Это программное обеспечение позволяет решать системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов в одном, двух и трех измерениях. Наибольший интерес, с точки зрения обогатительных процессов представляют возможности программы в областях: расчета межфазной поверхности при изучении флотационных свойств (рис.1), течения в пористых средах при изучении, например, процесса фильтрации и моделирование течения при перекачке центробежными насосами.

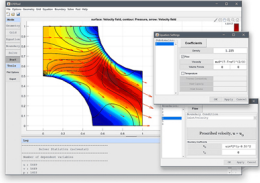


*Рисунок 1. Модель трехфазной системы, построенная с помощью интерфейса Three-Phase Flow, Phase Field (Трехфазная система, метод фазового поля).*

OpenFOAM — это бесплатное программное обеспечение CFD с открытым исходным кодом, которое обладает широким спектром возможностей для решения любых задач - от моделирования сложных потоков жидкости (рисунок 3), связанных с химическими реакциями, турбулентностью и теплопередачей, до механики твердого тела и электромагнетизма. [4]. Являясь бесплатным решением OpenFOAM используется как база для вычисления с помощью других инструментов, например таких как CFDTool™. CFDTool™ — это набор инструментов MATLAB® Computational Fluid Dynamics (CFD) для моделирования и симуляции потоков жидкости с сопряженным теплообменом (рис. 2) [4].

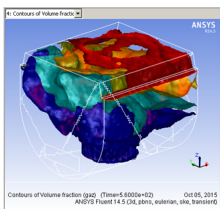
Основанный на FEA Tool Multiphysics™, CFDTool специально разработан для того, чтобы максимально облегчить моделирование динамики жидкости и теплообмена. Набор инструментов CFDTool MATLAB включает в себя следующие функции: автоматическая генерация сетки и сетки, моделирование потоков вязкой несжимаемой жидкости (уравнения Навье-Стокса); сжимаемые невязкие потоки (уравнения Эйлера);

моделирование ламинарных и турбулентных течений (модели турбулентности k-эпсилон и k-омега); постобработка и визуализация полученных данных.



*Рисунок 2. Моделирование реологических свойств потока в CFDTool™[4].*

Эффективным инструментом для моделирования гетерогенных сред с применением методов вычислительной гидродинамики является широко распространенный программный комплекс ANSYS Fluent. Это мощный решатель задач для объектов, представляющих собой области, в которых протекают гидродинамические и обменные процессы (рис. 3) [5]. Программное обеспечение ANSYS Fluent содержит широкие возможности физического моделирования, необходимые для моделирования потока, турбулентности, теплообмена и реакций.



*Рисунок 3. Изоповерхности газовой дисперсной фазы в камере флотомашины.*

Пакет обладает следующими возможностями: 2D осесимметричное моделирование с вихрями и трехмерными потоками; использование неструктурированной сетки; моделирование стационарных или переходных течений; симуляция всех скоростных режимов; моделирование невязких, ламинарных и турбулентных течений; моделирование течения ньютоновской и неньютоновской жидкости. Среди

перечисленных программных продуктов программный модуль ANSYS Fluent обладает самым широким спектром возможностей моделирования потока жидкости и газа для промышленного применения с учетом турбулентности, теплообмена, химических реакций. Было доказано, что при правильных действиях пользователя в процессе моделирования использование коммерческого программного обеспечения ANSYS Fluent может привести к экономии времени и затрат при проектировании [5].

Значительные успехи в области виртуальных технологий и электронных отчетов позволяют инженерам делать необходимые оценки и суждения по данному инженерному замыслу. В ближайшем будущем в промышленности CFD проектирование выйдет на одну из ведущих позиций позволяя реализовывать принцип «разработки с нулевым прототипом». Дальнейшее развитие CFD программ будет направлено на объединение множество различных моделей, описывающих тот или иной аспект процесса, в одну комплексную модель, а также в сокращении времени расчета. Несмотря на преимущества моделирования методами CFD, следует помнить и об погрешностях в вычислениях. Визуализация численных решений с использованием векторов, контуров или анимационных фильмов нестационарных потоков - безусловно, самый эффективный способ интерпретации огромного количества данных, полученных в результате численного расчета [6-10]. Однако, любые полученные числовые результаты всегда должны быть тщательно изучены, прежде чем будут использоваться на практике. Следовательно, пользователь CFD должен, прежде всего, изучить теоретические аспекты и зависимости изучаемого процесса, а также научиться правильно анализировать полученные данные и делать критические суждения о вычисленных результатах.

## **Благодарности**

Авторы выражают благодарность зав. каф. ОПИ Горного Университета, д.т.н., проф. Александровой Татьяны Николаевны, а также руководителю гранта доц. каф. ОПИ Горного Университета, к.т.н., Ромашеву Артёму Олеговичу.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК МК-5915.2018.5.

## *Список литературы*

1. Tu J., Yeoh G. H., Liu C. Computational fluid dynamics: a practical approach. – Butterworth-Heinemann, 2018.
2. Александрова Т. Н., Арустамян К. М., Романенко С. А. Применение математических методов анализа при оценке мировой практики селективной флотации медно-цинковых и колчеданно-полиметаллических руд //Обогащение руд. – 2017. – №. 5. – С. 21-27.
3. Weinhold I., Parry J. The third wave of CFD //2013 NAFEMS World Congress, Salzburg, Austria. – 2013.
4. CFDTool™ - An Easy to Use CFD Toolbox for MATLAB® // GitHubURL: <https://github.com/precise-simulation/cfdtool/blob/master/README.md> (дата обращения: 17.12.2018)
5. Скороходов В. Ф. и др. Применение методов вычислительной гидродинамики к исследованию и анализу процессов разделения минералов //Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – №. 3. – С. 179-187.
6. Aleksandrova T. N., Romashev A. O., Aleksandrov A. V. About modeling of rheological properties of heavy oil suspensions //Oil Industry. – 2016. – Т. 5. – С. 68-70.
7. Александрова Т. Н., Панова Е.Г. Технологические аспекты извлечения благородных и редких металлов из углеродсодержащих пород //Записки Горного института. – 2016. – Т. 217. – С. 72-79.
8. Aleksandrova T. N., Romashev A. O., Aleksandrov A. V. About modeling of rheological properties of heavy oil suspensions //Oil Industry. – 2016. – Т. 5. – С. 68-70.
9. Aleksandrova T. N., Romashev A. O., Semenikhin D. N. Mineral and technological aspects and promising methods for intensifying enrichment of sulfide gold-bearing ore //Metallurgist. – 2015. – Т. 59. – №. 3-4. – С. 330-338.
10. Андреев Е. Е., Львов В. В., Ромашев А. О. Влияние реологии пульпы на показатели работы гидроциклонов в циклах мокрого замкнутого измельчения //Горный журнал. – 2011. – №. 2. – С. 42.

{social}