

Как видно из траектории на рис. 2, траектория движения расплава в значительной мере отличается в зависимости от частоты тока в индукторе. Данные о траектории движения расплава, получаемые таким образом, могут быть использованы для выявления зависимостей между характером движения расплава, его температурой и частотой тока в индукторе.

Заключение. В данной работе была предложена реализация системы технического зрения для контроля положения расплава в индукторе левитационной печи. Работа описывает алгоритм фильтрации изображения тепловизора и определения контуров расплава, его положения относительно центра индуктора печи. Предложенный алгоритм может быть использован в составе системы управления левитационной плавки, как способ получения данных о положении расплава в индукторе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Okress E.C. et al. Electromagnetic levitation of solid and molten metals // J. Appl. Phys. – 1952. – Vol. 23, № 5.
2. Lohöfer G. Theory of an Electromagnetically Levitated Metal Sphere I: Absorbed Power // SIAM J. Appl. Math. – 1989. – Vol. 49, № 2.
3. Baake E., Shpenst V.A. Recent scientific research on electrothermal metallurgical processes // J. Min. Inst. – 2019. – Vol. 240. – P. 660–668.
4. Lewis J.C., Neumayer H.R.J., Ward R.G. The stabilization of liquid metal during levitation melting // J. Sci. Instrum. – 1962. – Vol. 39, № 11.
5. Zhang Y., Li D., Zhu W. Infrared and Visible Image Fusion with Hybrid Image Filtering // Math. Probl. Eng. – 2020. – Vol. 2020.
6. Gagliano S., Stella G., Bucolo M. Real-time detection of slug velocity in microchannels // Micromachines. – 2020. – Vol. 11, № 3.
7. Boikov A. V. Optoelectronic Method for Monitoring the State of the Cryolite Melt in Aluminum Electrolyzers / V.Yu. Bazhin, A.V. Boikov, A.V. Sman', P.V. Ivanov // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2015. – Vol. 56. – No. 1. – pp. 6–9.

УДК 542.65, 621.928.44

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЦЕССА ФЛОКУЛЯЦИИ В СГУСТИТЕЛЕ КРАСНОГО ШЛАМА JUSTIFICATION FOR THE APPLICATION OF MODERN COMPUTER MODELLING TECHNIQUES TO ASSESS THE FLOCCULATION PROCESS IN A RED MUD THICKENER

Пупышева Е.А., аспирант,
Санкт-Петербургский Горный университет, г. Санкт-Петербург, s215029@stud.spmi.ru
Pupysheva E.A., PhD student, St. Petersburg Mining University, St. Petersburg,
s215029@stud.spmi.ru

Аннотация. С точки зрения автоматизации сгуститель красного шлама – это сложный объект, обладающий большим количеством взаимосвязанных параметров и достаточно высокой инерцией, что значительно осложняет его управление. В работе предлагается использование CFD (Computational Fluid Dynamics) и DEM (Discrete element method) моделирования в виде комбинированного метода компьютерного инженерного анализа процесса флокуляции металлургических пульп. Применение данного метода исследования обосновывается широким спектром доступных инструментов,

которые помогут найти ответ на существующие нерешенные вопросы в области управления технологического процесса сгущения пульпы.

Ключевые слова: сгущение, флокуляция, гидрометаллургия, компьютерный инженерный анализ, CFD, DEM.

Key words: thickening, flocculation, hydrometallurgy, computer-aided engineering analysis, CFD, DEM.

Введение. Metallургическая промышленность представлена оборудованием с большим внутренним полезным объемом. Такие аппараты обладают большой инерционностью между входными и выходными продуктами. В рассматриваемом нами агрегате инерция по каналу расхода питающей пульпы может достигать 24 часа в зависимости от размеров. Вопрос моделирования исследуемого в работе технологического процесса, а именно сгущение красного шлама, заслуживает внимания по целому ряду причин. Автоматизация данного процесса является сложной задачей ввиду наличия таких свойств как многосвязность, высокая инерционность и большое количество выходных параметров [1]. Совокупность этих качеств не позволяет обеспечить эффективное управление объектом с помощью классических систем управления и требует изучения параметров влияющих на процесс с применением более сложных и современных методов компьютерного моделирования.

Основная часть. Проблема состоит в том, что модель радиального сгустителя делится на зоны, каждая из которых является подмоделью. Подмодели агрегации, свободного движения частиц (уравнения Стокса), зона стеснения (Ричардсона-Заки), зона гребков, зона выше питающего стакана – осветленного раствора. Обобщенная модель аппарата сгущения красных шламов включает подмодель зоны флокуляции. Процесс флокуляции протекает в питающем стакане, размер и форма образующейся флокулы играют ключевую роль в процессе свободного осаждения.

Так, в зависимости от геометрических особенностей агрегата происходит распределение многофазных потоков внутри его рабочего пространства, что в свою очередь может влиять на интенсивность процесса флокуляции, а также на чистоту слива сгустителя. Зачастую в моделях применяется допущение, согласно которому в зоне осветленного раствора отсутствуют твердые частицы, однако в реальных условиях из-за достаточно высоких скоростей потоков образуются зоны завихрений от центра сгустителя к его краям, что и провоцирует вынос твердого вещества в желоба с алюминатным раствором, особенно сильно данный эффект проявляется при высоком уровне постели. При моделировании не учитывается или сам процесс флокуляции, или форма и симметрия образующихся флокул, хотя в реальных условиях практика добавления флокулянтов получила повсеместное использование, так как она позволяет в несколько раз повысить скорость сгущения. От работы подмодели зоны агрегации зависит работа основных зон сгустителя. Зона агрегации требует оптимизации, где в качестве параметра оптимизации выступает средний размер и форма сгущенного кластера. На данный момент не существует прибора, который мог бы отслеживать данный параметр в динамике или с небольшой дискретностью. Отбор пробы должен быть произведен на выходе из питающего стакана, который, как правило, имеет высоту порядка двух и более метров. Флокула является кластером нестабильным, поэтому уже на этапе пробоотбора будет происходить деагрегация образованной флокулы, поэтому измерение самого диаметра, пусть даже с небольшой периодичностью невозможно. Получения проб частиц затрудняется ограничением со стороны промышленного и лабораторного оборудования. Пробоотборники могут разрушить нестабильные частицы, а не инвазивные методы имеют ограничения в точности из-за налипания частиц или вероятности наложения частиц на изображения [2, 3].

Флокуляция представляет собой процесс смешения укрупненных частиц с флокулянтами, в ходе которого образуются рыхлые агрегаты или хлопья. Флокуляция бази-

руется на уравнении популяционного баланса (РВЕ). Модель баланса популяций была впервые описана Смолуховским в 1917 г. Создание систематической стратегии для разработки моделей РВЕ, которые одновременно реалистичны для промышленных предприятий и математически просты для онлайн-приложений, является первым шагом к более широкому использованию моделей РВЕ в промышленности.

Экспериментально, короткое время отклика агрегации и разрушения затрудняет улавливание динамики роста флокул. Характеристики потока, такие как скорость сдвига, интенсивность турбулентности и концентрация твердых частиц, оказывают сильное влияние на свойства образующихся флокул, приводя к изменению их размера, плотности и пространственной структуры, что в свою очередь влияет на гравитационное осаждение и, следовательно, на общую эффективность разделения [4, 5]. Измерения свойств флокул (гранулометрический состав, пористость, плотность) и характеристик потока во время проведения процесса также являются сложной задачей, особенно это касается флокуляции в аппарате сгущения. Однако, компьютерное моделирование стало эффективной альтернативой для исследования поведения процесса [6–8].

Ранее описанный подход на основе РВЕ интегрирует уравнения баланса популяции в рамках вычислительной гидродинамики, что позволяет описать изменение распределения частиц по размерам как во времени, так и в пространстве. Несмотря на его широкое применение, силы, действующие на флокулы, и физические параметры сформированных флокул пока не могут быть учтены. Вычислительная гидродинамика (CFD) – это процесс математического моделирования физического явления, связанного с потоком жидкости, и его численного решения. Динамический подход учитывает реалистичную пространственную и временную эволюцию флокуляции, в которой траектории, столкновения и модели прикрепления могут быть явно отражены, но за счет интенсивных вычислительных ресурсов.

Обычно единственным способом оптимизации конструкции для инженера является проведение физических испытаний на прототипах. В программном анализе CFD проводится исследование потока жидкости в соответствии с ее физическими свойствами, такими как скорость, давление, температура, плотность и вязкость. Чтобы практически сгенерировать точное решение для физического явления, связанного с потоком жидкости, эти свойства должны учитываться одновременно.

DEM – это, по сути, первостепенный физический метод, который рассматривает каждую частицу гранулированного материала по отдельности. Каждая частица представлена через характерную форму и размер, которые взаимодействуют с другими частицами и геометрией аппарата.

Заключение. Использование комбинированных методов для повышения качества цифровых моделей и получения достоверных данных является удобным и современным инструментом для проведения исследований сложных технологических процессов. Приведенные в работе возможности вышеуказанных ПО подтверждают возможность оценить необходимые параметры процесса флокуляции в аппарате сгущения металлургических пульп.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fawell P.D. et al. Enhancing Gravity Thickener Feedwell Design and Operation for Optimal Flocculation through the Application of Computational Fluid Dynamics // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2021. Vol. 42, № 7. P. 496–510.
2. Wilms A., Meier R., Kleinebudde P. Development and Evaluation of an In-line and On-line Monitoring System for Granule Size Distributions in Continuous Roll Compaction/Dry Granulation Based on Laser Diffraction // *Journal of Pharmaceutical Innovation*. 2021. Vol. 16, № 2. P. 247–257. doi: 10.1007/s12247-020-09443-3.

3. Madarász L. et al. In-line particle size measurement based on image analysis in a fully continuous granule manufacturing line for rapid process understanding and development // International Journal of Pharmaceutics. 2022. Vol. 612. P. 121280. doi: 10.1016/j.ijpharm.2021.121280.

4. Liang L. et al. A review of the modern characterization techniques for flocs in mineral processing // Minerals Engineering. 2015. Vol. 84. P. 130–144.

5. Saxena K., Brighu U. Comparison of floc properties of coagulation systems: Effect of particle concentration, scale and mode of flocculation // Journal of Environmental Chemical Engineering. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 8, № 5.

6. Duan X. et al. Simulation of the hydrate blockage process in a water-dominated system via the CFD-DEM method // Journal of Natural Gas Science and Engineering. Elsevier B.V., 2021. Vol. 96.

7. Yao Y., Su J.-W., Luo Z.-H. CFD-PBM modeling polydisperse polymerization FBRs with simultaneous particle growth and aggregation: The effect of the method of moments // Powder Technology. 2015. Vol. 272. P. 142–152. doi: 10.1016/j.powtec.2014.11.037.

8. Lvov V., Chitalov L. Semi-Autogenous Wet Grinding Modeling with CFD-DEM // Minerals. 2021. Vol. 11, № 5. P. 485. doi: 10.3390/min11050485.

УДК 550.8.028

ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗОЛИРОВАННЫХ ПОДЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР АНТАРКТИДЫ TECHNOLOGIES AND TECHNICAL MEANS FOR STUDYING ISOLATED SUBGLACIAL LAKES OF ANTARCTICA

Ракитин И.В., студент, Санкт-Петербургский Горный университет,
механико-машиностроительный факультет, кафедра машиностроения,
Горные машины и оборудование, ilja.rakitin@mail.ru
Rakitin I.V., Student, St. Petersburg Mining University, Faculty of Mechanical Engineering,
Department of Mechanical Engineering, Mining Machinery and Equipment, 6th year student,
ilja.rakitin@mail.ru

Аннотация. За последние 60 лет исследований материка Антарктида было обнаружено свыше 400 подледниковых водоемов [1] – источников ценной научной информации [2, 3], многие из которых скрыты от поверхности слоем льда на протяжении уже более миллиона лет. Приведен краткий обзор проектов исследования подледниковых озер Антарктиды, в частности применяемых технологий бурения скважин доступа и технических средств отбора проб донных отложений.

Ключевые слова: Антарктида; бурение ледников, подледниковые озера; вскрытие, отбор проб, подледниковые отложения.

Abstract. Over the past 60 years of research on the Antarctic continent, more than 400 subglacial reservoirs have been discovered [1], which are sources of valuable scientific information [2, 3], and many of which have been hidden from the surface by a layer of ice for more than a million years. A brief review of projects for the study of subglacial lakes in Antarctica, in particular, the technologies used for drilling access wells and technical means for sampling bottom sediments, is given.

Key words: Antarctica; drilling of glaciers, subglacial lakes; opening, sampling, subglacial deposits.

Введение. На сегодняшний день в Антарктиде обнаружено более 400 подледниковых озер. Всех их можно классифицировать на изолированные (не связанные с гид-