

Применение методов вычислительной гидродинамики в алюминиевой промышленности

В статье рассказывается об опыте использования методов вычислительной гидродинамики (CFD) для оптимизации процессов сепарации на одном из крупнейших в Европе рафинировочном заводе, занимающемся производством первичного алюминия и принадлежащем компании *Aughinish Alumina* (Ирландия), которая входит в состав глиноземного отделения объединенной компании «Русский Алюминий».

Компания *Aughinish Alumina* использует метод Байера для производства глинозема (Al_2O_3), который является исходным сырьем для получения алюминия и некоторых видов керамики. В период строительства глиноземного завода (1978–1983 годы) он являлся крупнейшим частным инвестиционным проектом в Европе (около 1 млрд евро). В первый же год своей работы завод произвел более 640 тыс. тонн глинозема. Успех компании и потребность в ее продукции привели к росту производства в последующие десятилетия, и в результате к 2005 году компания вышла на уровень в 1,6 млн тонн в год. К концу 2006 году планировалось увеличить объем производства глинозема еще на 200 тыс. тонн. Однако компания столкнулась с проблемой, связанной с тем, что последний (из одиннадцати) испаритель в батарее был спроектирован для работы с производительностью значительно меньшей, чем требуется для такого существенного увеличения объемов производства.

Наиболее простым и распространенным способом извлечения из бокситовой руды гидроокиси алюминия является способ, предложенный Байером. Он основан на способности гидроокиси алюминия хорошо

растворяться при высокой температуре (более 250 °С) и высоком давлении (около 5000 кПа) в растворе гидроокиси натрия ($NaOH$) высокой концентрации. Бесполезные для получения алюминия вещества, входящие в состав боксита, не переходят при этом в растворимую форму и выпадают в осадок. Полученный раствор алюмината натрия $NaAlO_2$ затем попадает в испарительный блок – батарею (в большинстве случаев это 8-10 последовательно соединенных испарителей), снабженную сепаратором для отделения пара от жидкости.

Следующей задачей после выщелачивания является задача отделения раствора от твердых включений. Наиболее экономичным методом отделения твердых частиц от раствора является осаждение, то есть процесс накопления твердого осадка на дне сосуда за счет его постепенного осаждения в жидкости. Далее следует этап декомпозиции, который сводится к самопроизвольному разложению алюминатного раствора на отдельные химические соединения – гидроокись алюминия $Al(OH)_3$ и щелочь $NaOH$. Неравновесность этого процесса обеспечивается кристаллизацией гидроокиси алюминия и ростом кристаллов со временем. Для сдвига равновесия в раствор вводится затравка – некоторая масса мелких кристаллов, на которых начинают нарастать новые слои гидроокиси.

Конечный продукт (глинозем) получают из гидрата окиси алюминия путем прокаливания (кальцинации) при очень высоких температурах (свыше 1000 °С) в специальных печах.

На рис. 1 показана исходная конструкция испарителя. На нем видно, как струя раствора, поступающе-

го в сосуд через входной патрубок, ударяется в поверхность раствора на дне сосуда, отражается от нее и отбрасывается на стенку сосуда. Данная проблема, а также недостаточная сепарация приводят к образованию накипи на стенках сосуда. Ситуация усугубляется при увеличении объема раствора, поступающего в испарительный блок.

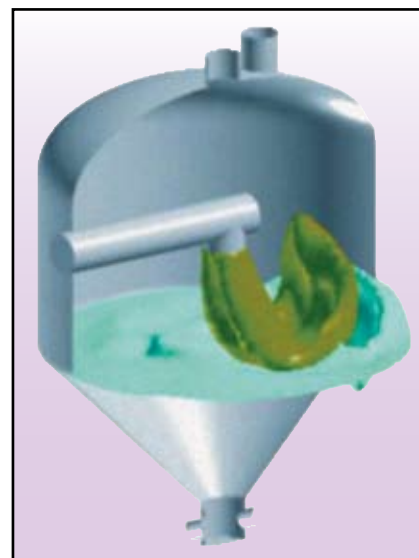


Рис. 1. Исходная конструкция испарителя

Испаритель представляет собой сосуд высокого давления, на входе в который установлен специальный регулятор для контроля внутреннего давления. Выходя из регулятора с большой скоростью в пространство с давлением, ниже величины давления кипения, раствор пульпы (смесь жидкости и твердых включений) вскипает, происходит сильное пароотделение. Пар поднимается кверху сосуда к выходному патрубку и далее попадает в теплообменный блок. При этом жидкость (раствор) опускается на дно сосуда, где она накапливается и направляется в следующий испаритель.

Последний испаритель на глиноземном заводе Aughinish имеет относительно малые размеры, если учитывать планируемое увеличение производительности. Однако вариант его замены на сосуд с большими размерами был отвергнут как экономически невыгодный.

Главный вопрос (при сохранении исходного размера испарителя) заключался в том, насколько усугубятся уже существующие проблемы при дальнейшем росте производительности. К этим проблемам можно отнести следующие:

- ▶ пар недостаточно эффективно отделялся от жидкого раствора, наблюдалось его загрязнение твердыми включениями;
- ▶ значительная доля твердых частиц осаждалась на стенке сосуда (в виде накипи). Это еще больше уменьшало объем сосуда, что влияло на эффективность процесса сепарации и ограничивало доступ в сосуд для ремонта патрубков.

Дополнительное осаждение накипи происходит вокруг выходного патрубка в верхней части сосуда. Соответственно, уменьшается сечение патрубка и происходит увеличение внутреннего давления, что не лучшим образом сказывается на качестве отводимого пара. Более того, загрязненный пар снижает эффективность работы теплообменного оборудования (ухудшаются условия теплообмена во внутреннем тракте теплообменника). Толщина накипи на стенках выходного трубопровода требует ежегодной замены клапанов на этой линии, что приводит к дополнительным издержкам.

Отдельная, но существенная проблема состояла в эрозии входного патрубка под действием твердых частиц, содержащихся в растворе.

Глиноземный завод Aughinish постоянно использует более 250 000 м³ технологического раствора, непрерывно циркулирующего по резервуарам, сосудам высокого давления и трубопроводам в течение 364 дней в году. В году есть всего один лишь день, когда технологические процессы останавливаются для проведения технического обслуживания и замены изношенных деталей. Это означает, что возможности внедрить или испы-

тать альтернативные конструктивные решения чрезвычайно ограничены, особенно если учесть размеры сосуда и количество накипи, которое необходимо удалять. Кроме того, исправить внесенные конструктивные изменения в случае необходимости можно будет только через год.

Традиционные полупырические методы расчета в данной ситу-

раствор пульпы. Это также увеличивает количество капель жидкости, которые попадают на стенки резервуара, увлекаются паром и, соответственно, загрязняют его.

Методы CFD оказались особенно полезными при исследовании, разработке и оптимизации уже существующих конструкций испарителей с целью увеличения их производительности.

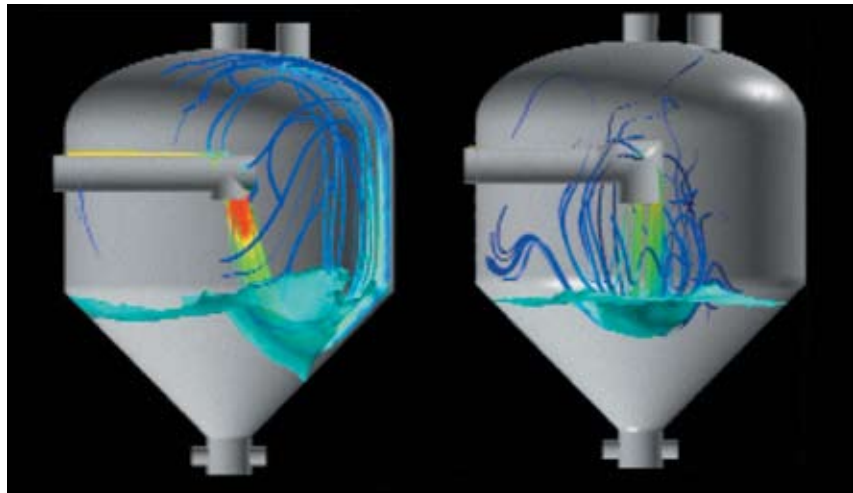


Рис. 2. Варианты конструкции испарителя: исходный (слева) и доработанный с помощью CFD (справа)

ации оказались неэффективными, поэтому было решено использовать методы CFD. В качестве прикладного пакета использовался программный продукт ANSYS Fluent.

На первом этапе было смоделировано течение многофазного потока (жидкость и пар) в исходной геометрии сосуда. Расчет был выполнен на неструктурированной тетраэдрической сетке, состоящей из примерно 700 тыс. элементов, в нестационарной постановке с малым шагом по времени. Инженеры впервые смогли детально изучить структуру течения внутри испарителя. Были получены новые представления о взаимодействии между входным патрубком и поверхностью жидкости в нижней части сосуда, а также исследована эффективность работы сепарационной секции при различных уровнях жидкости в сосуде. Кроме того, с помощью модели DPM (Discrete Particle Model, или модель Лагранжевых частиц) программы Fluent была изучена динамика эрозии стенок входного патрубка.

Из анализа результатов расчета стало очевидно, что поток пульпы попадает в сосуд с высокой скоростью и под углом, что увеличивает глубину проникновения струи в

структуре течения потока внутри сосуда была выбрана новая геометрия входного патрубка (рис. 2), которая позволила снизить скорость на выходе из патрубка со 100 м/с до 60 м/с. Кроме того, средняя скорость восходящих потоков пара уменьшилась в 5 раз и было получено более равномерное распределение объемной концентрации пара внутри сосуда.

Преимущества использования методов вычислительной гидродинамики оказались очевидными. Удалось избежать значительных денежных затрат и остановки производства с целью монтажа большего по размеру испарителя. Использование модели образования эрозии также позволило выбрать наиболее стойкие к эрозии материалы.

Описанные результаты являются лишь частью обширной программы исследований, направленных на оптимизацию работы сепарационного и фильтрующего оборудования.

Эдвард Трон (Edward Throp),
компания ANSYS, Inc.,
Кертис Марш (Curtis Marsh),
компания Aughinish Alumina,
Денис Хитрых, компания CADFEM CIS