А.А.Гальнбек, И.Н.Белоглазов, К.П.Власов, О.А.Дубовиков, О.В.Зарянова, Т.Ф.Вырубова, А.Ю.Фирсов, З.М.Туринский, Е.А.Иванов, Э.Д.Кадыров, А.С.Анашкин, М.А.Ласточкина, И.Ю.Миловидова, В.О.Голубев, Г.Г.Климентенок, А.М.Бондарчук, А.А.Орищук, Н.Н.Максимец, И.А.Спичак

УДК 669.041+669.012

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛОВ

Приведены краткие результаты научно-исследовательских работ, выполнявшихся преподавателями, аспирантами и студентами кафедры печей, контроля и автоматизации металлургического производства в 2000 г. по двум основным направлениям: моделирование технологического оборудования производства металлов и моделирование систем управления энергетическими процессами промышленных печей производства металлов.

В рамках первого направления исследований разработаны математические модели конвертерного передела плавильного цеха комбината «Печенганикель», процесса рудно-термической плавки, процессов растворения и выщелачивания, процесса очистки сточных вод с использованием гидрокарбоалюмината кальция; разработана технология переработки бедных по цинку железосодержащих пылей в вельц-печи; предложен подход к оптимизации процессов разделения суспензий с использованием пресс-фильтров LAROX PF Второе направление включает работы по разработке метода спектральных плотностей для синтеза систем управления с дискретным запаздывающим контролем и повышению эффективности управления газовым режимом конвертеров.

A brief summary of research and engineering activities performed by the lecturers, post-graduate and undergraduate students of the Department of Furnaces, Control and Automation of Metallurgical Processes in the year 2000 are given an account of. The two main lines of research activities were simulation of processing equipment for metal production and simulation of controlling systems for industrial metallurgical furnaces. The following mathematical models were developed in the first research line: converter transformation of the smelting workshop at the Pechenganikel metallurgical plant; thermal ore fusion process; dissolution and lixiviation processes; waste-water treatment using calcium hydrocarboaluminat. A technology of zinc-lean iron dust processing in a rotary-kiln was also developed. A suspension division method using LAROX PF press-filters was introduced. The second line of research comprises works on spectral density method development for synthesis of controlling systems with discontinuous lagging control and those on increasing efficiency of gas conditions manipulation in converters.

* * *

В 2000 г. научно-исследовательская работа кафедры печей, контроля и автоматизации металлургического производства Горного института осуществлялась в рамках госбюджетной тематики «Моделирование процессов, аппаратуры и систем управления промышленных печей и технологического оборудования производств металлов» по двум основным направлениям: 1) моделирование технологического оборудования производства металлов; 2) моделирование систем управления энергетическими процессами промышленных печей производства металлов.

В области моделирования процессов и аппаратуры производства тяжелых цветных металлов кафедрой печей, контроля и автоматизации металлургического производства

выполнен ряд научно-исследовательских работ. Одной из них явилось моделирование условий работы конвертерного передела плавильного цеха комбината «Печенганикель» (научный руководитель профессор А.А.Гальнбек).

В настоящее время в связи с коренным изменением состава и количества получаемого в плавильном цехе сырья его прежние плавильно-конвертерные мощности оказались излишними. Указанные изменения, помимо снижения плана по выпуску файнштейна, обусловлены резким изменением в номенклатуре сырья. Прекращение поступления на комбинат высокосернистой норильской руды и переход на получение при обогащении более богатых рудных концентратов привело к получению на переделе электроплавки значительно меньших по объему, но гораздо более богатых (13-18 % Ni, 9,0-11,0 % Cu) штейнов. Уже одно это обстоятельство существенно изменило условия работы конвертерного передела.

Другим существенным фактором стали изменения в конвертерной переработке холодных материалов. В связи с ликвидацией на комбинате «Североникель» плавки рудных материалов отпала возможность переработки на месте оборотного шлака, получающегося при конвертировании медного никельсодержащего штейна на черновую медь. Этот «медный» шлак в качестве главного холодного материала поступает сейчас на конвертерный передел «Печенганикеля»; масса его составляет в среднем около 10 % от массы собственного штейна.

Таким образом, конвертеры вынуждены работать сейчас на относительно богатом медно-никелевом «горячем» штейне, перерабатывая за счет ограниченных тепловых резервов процесса значительную массу инертного в тепловом отношении «медного» шлака.

Указанные особенности работы конвертерного передела комбината вызывают определенные трудности в проведении процесса и снижение его показателей. Поэтому представлялось актуальным провести анализ условий этой работы и на его основе выработать рекомендации по совершенствованию технологии. Поскольку специальных заводских исследований существующей технологии конвертирования в цехе не проводилось, указанный анализ мог базироваться лишь на расчетных данных, получаемых в результате математического моделирования процесса. Для этого была разработана модель, описывающая материальные и тепловые балансы конвертирования.

В соответствии с заводской практикой весь процесс (цикл) конвертирования при разработке модели был подразделен на три стадии: набор богатой массы, «холостая» продувка и варка файнштейна. В свою очередь, стадия набора подразделялась на несколько отдельных продувок, каждая из которых заканчивалась сливом наборного шлака. Для каждой из них, как и для «холостой» продувки и варки файнштейна, составлялась модель развернутого материального и теплового балансов.

Результаты выполненной работы были переданы комбинату в качестве рекомендаций для выбора оптимального режима проведения операций конвертирования при вариациях в составе исходных материалов процесса.

Одной из работ в области моделирования систем управления процессами печей производства металлов является кандидатская диссертация Э.Д.Кадырова «Разработка метода спектральных плотностей для синтеза систем управления с дискретным запаздывающим контролем» (научный руководитель профессор А.А.Гальнбек). В работе предложен метод параметрического оптимизационного синтеза для систем автоматического управления при дискретном запаздывающем контроле выходного сигнала.

На основе системного подхода проведен анализ методов параметрического синтеза для сложных многосвязных технологических процессов. При этом учитывалось, что период отбора проб и запаздывание получения результатов измерения, обработки и анализа пробы являются основными параметрами, определяющими точность управления составом продуктов.

Разработана методика приближенного прямого расчета многосвязанных систем

управления с дискретным запаздывающим контролем путем применения для таких объектов метода спектральных плотностей. Согласно этой методике методами теории инвариантности в многомерную систему стабилизации вводятся перекрестные регуляторы так, что многомерная совокупность контуров обратной связи, корректирующих работу компенсатора, распадается на одноконтурные, автономные системы – квазисистемы.

Структурные линейные преобразования квазисистемы позволяют рассматривать ее в виде двух взаимодействующих подсистем: 1) квазиинвариантного компенсатора, подвергающегося стационарным случайным возмущающим воздействиям в виде неуправляемых колебаний; 2) замкнутого контура, включающего линейную модель технологического процесса и оператор формирования сигналов обратной связи по результатам дискретного запаздывающего контроля выходного показателя. Возмущающим воздействием для этого контура является сигнал недокомпенсации на выходе первой подсистемы.

Структурные преобразования контура обратной связи в автономной квазисистеме при дискретном запаздывающем контроле сводятся к двум последовательно решаемым задачам: параметрической оптимизации ПИ-алгоритма формирования сигналов обратной связи и анализу спектральной плотности колебаний выходных показателя при оптимальных параметрах настройки контура обратной связи и заданной функции спектральной плотности сигнала недокомпенсации возмущений. При этом оптимизация дискретного контура обратной связи заменяется оптимизацией непрерывной обратной связи эквивалентной системы, характеризующейся величиной эквивалентного запаздывания $\tau_{экв}$.

Формализована зависимость параметра $\tau_{экв}$ от параметров дискретного запаздывающего контроля путем регрессионной обработки результатов идентификации во всех точках плана. С использованием полученной зависимости $\tau_{экв}$ можно исследовать непрерывную функцию спектральной плотности сигнала на выходе объекта с целью выбора оптимальных значений настроек регулятора в цепи обратной связи и решения вопроса о целесообразности компенсации тех или иных возмущений на входе.

Установлено, что на этапе проектирования системы представляется возможным оценить те параметры непрерывного косвенного контроля выходной величины $\beta(t)$, непосредственно не поддающейся непрерывному измерению, обеспечение которых делает целесообразным применение косвенных измерений вместо непосредственного дискретного и запаздывающего контроля в цепях оперативного управления.

Для прямого приближенного расчета дисперсии на выходе системы стабилизации с линейным фильтром оценивания необходимо представить уравнения фильтра в виде передаточных функций по разработанной методике и применить для расчета дисперсии метод спектральных плотностей.

Применение разработанных методов к анализу проекта печи Ванюкова позволило выявить неэффективность управления составом штейна и шлака по результатам дискретного и запаздывающего контроля состава этих продуктов и наметить способ управления при непрерывной оценке состава, получаемой с помощью фильтра оценивания по грубым измерениям давления шлакового и штейнового желобов на опору.

Другим направлением исследований в области моделирования работы пирометаллургических аппаратов являлись исследования, направленные на разработку рекомендаций по оптимальному управлению газовым режимом конвертеров, которые проводились под руководством профессора К.П.Власова.

В настоящее время весьма актуальной является задача оптимизации газового режима конвертеров цветной металлургии, горизонтальных и вертикальных.

Конвертерные газы, содержащие диоксид серы, чаще всего используются для производства серной кислоты. Конвертеры выдают газ неравномерно, с перерывами, что связано с особенностями технологии. Кроме того, содержание диоксида серы в конвер-

терных газах меняется в зависимости от технологической операции, выполняемой конвертером. Концентрированные газы подаются в цех производства серной кислоты, а разбавленные сбрасываются в дымовую трубу. Управление подачей газов на сернокислотное производство на отечественных предприятиях осуществляется вручную оператором, который следит за показаниями приборов технологического контроля состояния каждого из конвертеров и, изменяя положение дроссельных заслонок на газоходах, перераспределяет газовые потоки.

Ручное управление газовым режимом конвертеров при помощи дроссельных заслонок характеризуется целым рядом недостатков. Оператор, вынужденный в течение смены следить за показаниями множества приборов (на каждом конвертере контролируются расход дутья, разрежение в пылевой камере и температура конвертерных газов), допускает ошибки в управлении, вследствие чего нередки случаи, когда более концентрированные газы идут в трубу, а разбавленные – на сернокислотное производство. Кроме того, поскольку оператор, находящийся в отдельном помещении, не видит работающих конвертеров, разрежение, которое он поддерживает в газовом тракте каждого конвертера с помощью дроссельной заслонки, зачастую не соответствует необходимому для оптимальной эвакуации газов, что влечет либо выбросы газов в атмосферу цеха из-под напыльника (если разрежение слишком мало), либо избыточный подсос воздуха под напыльник (если разрежение велико). Наконец, потери электроэнергии при управлении производительностью дымососа при помощи дросселирования составляют от 40 до 60 %, при этом однозначная связь между положением дроссельной заслонки и разрежением в газовом тракте отсутствует.

Перечисленные недостатки могут быть в значительной степени устранены при передаче функций управления газовым режимом конвертеров автоматизированной системе с использованием преобразователя частоты для регулирования производительности дымососа. Для организации автоматической системы управления разработана математическая модель газового режима конвертеров, позволяющая вычислить содержание диоксида серы в конвертерных газах на выходе из пылевой камеры конвертера как функцию измеряемых на объекте расхода дутья, подаваемого в конвертер, разрежения в пылевой камере и температуры газов на выходе из последней. Модель представляет собой систему уравнений, описывающих охлаждение газов и их разбавление подсасываемым воздухом на всем пути от ванны конвертера до выхода из пылевой камеры.

Так как наличие или отсутствие выброса конвертерных газов из-под напыльника не поддается измерению, а может быть зафиксировано лишь визуально, то при разработке алгоритмического обеспечения системы управления газовым режимом горизонтальных конвертеров был использован математический аппарат теории нечетких множеств.

На основе разработанной базы правил логического вывода представляется возможным производить оценку характера газоудаления из конвертера и использовать ее для принятия управляющего решения. Одновременно с оценкой газового режима конвертера осуществляется контроль температуры газов на выходе пылевой камеры с тем, чтобы указанная температура не превышала предельных значений, диктуемых условиями сохранности оборудования газового тракта.

В качестве управляющей переменной в данной системе используется разрежение в газовом тракте конвертера. В зависимости от полученной оценки газового режима конвертера и температуры конвертерных газов принимается решение об изменении разрежения в газовом тракте в ту или иную сторону на величину тем большую, чем больше отклонение газового режима от нормального состояния.

Описанный алгоритм реализуется на микроконтроллере, входящем в состав частотного преобразователя. Система работает в циклическом режиме, а частота оценки газового режима и осуществления управ-

ляющего воздействия выбирается из условий адекватного реагирования системы на изменение состояния объекта управления. Алгоритм функционирования остается открытым для корректировки оператором, который может изменять параметры оценки газового режима и коэффициенты усиления по каналу управления, добиваясь наилучшего качества функционирования системы.

Описанная система предполагается к внедрению в плавильном цехе комбината «Печенганикель» для управления газовым режимом горизонтальных конвертеров и в металлургическом цехе комбината «Североникель» для оптимизации газового режима вертикальных конвертеров. В результате внедрения системы планируется свести к минимуму газовые выбросы в цех, поднять содержание диоксида серы в газах, поступающих на сернокислотное производство, на 1,5-2 % и обеспечить поддержание температуры газов в заданных пределах.

Под руководством доцента Т.Ф.Вырубовой проводились исследования по моделированию процесса рудно-термической плавки (РТП) для переработки сульфидных руд и концентратов, особенности которого препятствуют широкому внедрению современных автоматизированных систем управления.

Известно, что эффективность автоматизированного управления тесно связана с его математическим обеспечением. Анализ литературных данных показал, что математические описания РТП отображают либо динамику энергетических режимов без учета влияния характера плавления шихты, образования продуктов плавки, изменения уровня шлаковой ванны и других параметров, либо функциональные однопараметрические связи отдельных технологических параметров. Эти связи, как правило, являются результатом экспериментальных исследований РТП. Так, например, в одной из работ при регулировании потребляемой мощности по каналу перемещение электродов – проводимость шлаковой ванны РТП описана безынерционным усилителем.

В отличие от ранее разработанных моделей, предлагаемая модель позволяет связать изменения силы тока, масс штейна, шлака и газов, общего уровня ванны РТП и заглубления электродов. Массовые потоки штейна, шлака и газов оцениваются по основным химическим компонентам Ni, Cu, Co, Fe, S, Al_2O_3, SiO_2, MgO, CaO и пр.

При данном тепловом и технологическом режиме поддержание постоянства силы тока, которая однозначно определяет потребляемую мощность, требует минимального перемещения электродов; ее изменения рассматриваются как случайный стационарный процесс с нормированной автокорреляционной функцией

$$R(\tau) = e^{-0,0125\cdot\tau}\left[1 - 0,1\sin(0,0125\pi\tau)\right]$$

и нормированной спектральной плотностью

$$S^{н}(\omega) = \frac{-0,025}{1,55\cdot10^{-4} + \omega^2} -$$

$$-0,1\frac{0,0125\pi - \omega}{1,56\cdot10^{-4} + (0,0125\pi - \omega)^2} -$$

$$-0,1\frac{0,0125\pi + \omega}{1,56\cdot10^{-4} + (0,0125\pi + \omega)^2}.$$

Общий уровень ванны в модели РТП представлен зависимостью, учитывающей изменение объемов штейна, шлака, конусов шихты, заглубленных в расплав, и погруженных в расплав электродов. Взаимосвязь заглубления электродов с общим уровнем ванны, массой шихты, силой тока и напряжением отображена в последнем уравнении модели.

Таким образом, РТП как объект управления описывается системой шести неоднородных дифференциальных уравнений первого порядка. Решение этой системы при детерминированных возмущающих воздействиях по разным каналам показало, что модель адекватна реально существующим процессам в РТП.

В области разработки и совершенствования пирометаллугических процессов под руководством профессора И.Н.Белоглазова совместно с кафедрой экологии, аэрологии и охраны труда был проведен комплекс исследовательских работ, направленных на применение вельц-процесса для переработки

бедных по цинку железосодержащих пылей, получаемых на предприятиях черной металлургии.

В частности, на промплощадке ОАО «Северсталь» (г.Череповец) в настоящее время накоплено более 8 млн т металлургических отходов, содержащих токсичные компоненты (Pb, Zn, Fe и др.), загрязняющие окружающую среду. По содержанию полезных компонентов (Fe, Zn и др.) отвальные материалы могут быть отнесены к потенциальным источникам вторичных материальных ресурсов, для утилизации которых необходимо разработать эффективные пути их переработки в рамках технического парка оборудования предприятия.

Наибольший вклад в общие валовые выбросы от объектов постоянного размещения производственных отходов комбината вносит пыль, содержащая тяжелые металлы (до 80 %).

Анализ мирового опыта по применению пиро- и гидрометаллургических процессов для переработки цинкжелезосодержащих пылей и шламов, а также изучение состава отходов комбината и технической базы его производств позволили обосновать целесообразность применения процесса вельцевания для переработки бедных по цинку железосодержащих пылей и определить оптимальные технико-экономические параметры реализации данного процесса.

В результате лабораторных и укрупненно-лабораторных исследований было установлено, что для переработки бедных по цинку железосодержащих пылей в условиях комбината АО «Северсталь» наиболее целесообразным является процесс вельцевания. Процесс подготовки цинкжелезосодержащих материалов к вельцеванию включает процессы шихтовки, скатывания и сушки. В качестве связующего целесообразно использовать бентонит с расходом 1 % от массы пыли. Крупность компонентов шихты при скатывании должна составлять от 0,5 до 10 мм. Температура сушки окатышей 150 °С. В качестве восстановителя для процесса вельцевания целесообразно использовать коксовую мелочь с расходом 40 % от массы пыли, причем около 40-50 % восстановителя вводится в окатыши, а остальные используются для уплотнения шихты и создания восстановительной среды. Показана принципиальная возможность полной или частичной замены коксовой мелочи более дешевым восстановителем – торфом. Оптимальный температурный интервал процесса вельцевания 1100-1200 °С.

В результате экспериментов были получены железосодержащие материалы (с остаточным содержанием цинка менее 0,1 %), пригодные для дальнейшего использования в основном производстве, и кондиционный цинковый концентрат.

Предложена математическая модель, описывающая закономерности процесса вельцевания. Результаты расчетов позволяют рекомендовать оптимальные параметры процесса, соответствующие наилучшим его технико-экологическим показателям. Экономическая оценка целесообразности внедрения предлагаемой технологии для переработки отвальных цинкжелезосодержащих отходов ОАО «Северсталь» показала, что срок ее окупаемости составляет 1,6 года.

По результатам работы А.М.Бондарчука была подготовлена и успешно защищена диссертационная работа «Выбор рациональных методов и средств защиты окружающей среды от загрязнения цинксодержащей пылью в условиях ОАО «Северсталь» (г.Череповец)» на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В рамках математического моделирования гидрометаллургического оборудования производства металлов под руководством профессора И.Н.Белоглазова были проведены исследования, направленные на разработку математической модели и математического описания кинетических закономерностей гидрометаллургических процессов растворения и выщелачивания важнейших технологических процессов гидрометаллургии, повышение эффективности которых невозможно без дальнейшего развития методов математического описания. Особое значение для оптимизации режимов работы системы аппаратов выщелачивания периодического, полунепрерывного и непрерывного действия имеют исследова-

ния закономерностей кинетики процесса и особенностей работы оборудования, для чего широко применяются методы физического и математического моделирования.

Результатом исследований стали следующие универсальные математические модели, позволяющие описывать закономерности кинетики механизмов растворения и выщелачивания с помощью математических зависимостей:

$$X(\tau) = 1 - \exp\left(-\frac{k\tau}{\tau_0 - \tau}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{kT}{1-T}\right);$$

$$X(\tau) = 1 - \exp\left(-\frac{k\tau^n}{\tau_0^n - \tau^n}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{kT^n}{1-T^n}\right);$$

$$X(\tau) = \left[1 - \exp\left(-\frac{k\tau}{\tau_0 - \tau}\right)\right]^m = \left[1 - \exp\left(-\frac{kT}{1-T}\right)\right]^m$$

где X – степень превращения; k, n и m – константы, зависящие от таких характеристик процесса, как температура, давление, крупность и структура растворяемых частиц и т.д.; τ_0 и τ – соответственно полное (условно полное) время завершения процесса и текущее время процесса; $T = \tau/\tau_0$ относительное время выщелачивания.

Применение предлагаемых уравнений в практике инженерных расчетов позволяет более точно описывать закономерности процессов, а также находить предельное время завершения процесса τ_0. Это особенно важно для определения показателей работы аппаратов, так как именно величина τ_0 необходима для проведения расчетов степени превращения.

Следует отметить, что рассматриваемые зависимости при определенных условиях могут быть преобразованы к известным кинетическим уравнениям и при некоторых значениях k, n и m совпадать с ними по форме.

Предлагаемые модели были использованы для разработки усовершенствованных моделей непрерывных процессов растворения и выщелачивания, которые учитывают влияние кинетических и гидродинамических факторов процесса, а также структуру потока в исследуемом аппарате.

Значения параметров k, τ_0, n и m могут быть рассчитаны также аналитическим (симплексно-интервальным) методом с использованием двух или трех точек, снятых с экспериментальной кривой. Применение симплексно-интервального метода позволяет сократить и упростить процедуру расчетов.

Достоверность полученных результатов была подтверждена сопоставлением теоретических и экспериментальных данных, полученных при проведении лабораторных и укрупненно-лабораторных экспериментов.

Приведенные выше зависимости были, в частности, использованы для разработки математической модели процесса очистки сточных вод с применением многофункционального коагулянта – гидрокарбоалюмината кальция. Исследования проводились совместно с кафедрой металлургии цветных металлов.

Гидрокарбоалюминат кальция (ГКАК) $4CaO\ Al_2O_3\ mCO_2\ 11H_2O$ является соединением, известным как компонент, образующийся при твердении цементного камня. В металлургической практике гидрокарбоалюминатные соединения кальция применяются в производстве высококачественного глинозема для полного разделения ионов алюминия и кремния.

Исследование возможности использования ГКАК в качестве коагулянта для очистки природных и сточных вод осуществлялось на ряде промышленных объектов и показало его высокую эффективность. Данный коагулянт образует с водой суспензию с однородной дисперсной фазой, обладающей большой активной поверхностью. Частицы коагулянта в водной среде не только выполняют роль зародышей твердой фазы, ионообменников, выделяющих в воду только ионы гидроксида (или при определенных составах и ионы кальция), но и обладают высокой адсорбционной способностью вследствие большой удельной поверхности (удельная поверхность 30 $м^2/г$, глубина анионного обмена 80 %).

Предложенная математическая модель и полученные математические зависимости для описания кинетики процесса очистки

сточных вод с применением многофункционального коагулянта – гидрокарбоалюмината кальция, были использованы для расчета оптимальных параметров реализации исследованного процесса.

Другим направлением исследований являлось проведение оптимизации процессов разделения суспензий с использованием высоко эффективных пресс-фильтров компании «LAROX OY» (научный руководитель профессор И.Н.Белоглазов).

Одним из основных технологических процессов, определяющих эффективность гидрометаллургических схем предприятий цветной металлургии, химической и обогатительной промышленностей и ряда других, является процесс фильтрации технологических пульп и сбросных растворов (или шламов), последние из которых представляют большую опасность для окружающей среды, прежде всего, вследствие наличия в них химически активных веществ и тяжелых металлов. Утилизация взвешенных частиц, содержащихся в сбрасываемых сточных водах и пульпах, требует постройки шламонакопителей, дорого обходящихся предприятию, занимающих большие площади и наносящих непоправимый вред окружающей среде, так как содержащаяся в пульпах влага проникает в почву и, сливаясь с подземными водами, заражает токсичными веществами большие территории.

В настоящее время на практике применяется большое число разработанных по принципу действия и конструкции фильтров, однако выбор оптимального варианта оформления процесса фильтрации в каждом конкретном случае требует проведения комплексных экспериментальных и теоретических исследований, причем для реализации последних широко применяются методы математического моделирования. Вышеизложенное подтверждает необходимость глубокого изучения теории фильтрования с целью дальнейшего использования накопленных знаний при математическом моделировании процессов фильтрования применительно к конкретным суспензиям и фильтровальным агрегатам.

Во многих типах фильтровального оборудования помимо собственно стадии фильтрования могут быть реализованы и иные процессы, к числу которых, в первую очередь, следует отнести промывку и сушку осадка. Одним из наиболее универсальных агрегатов, в котором последовательно и эффективно реализуются все три перечисленные стадии, является автоматизированный фильтр-пресс, оригинальность конструкции которого позволяет осуществлять прессование осадка при давлении 16 атм, а иные стадии разделения при 5-6 атм.

Одним из крупнейших производителей автоматизированных фильтр-прессов является финская компания «LAROX OY», выпускающая более 20 марок фильтров данного типа с эффективной площадью фильтрации от 1,6 до 144 м^2 и производительностью в пределах от 0,1 до 150 т/ч по сухому продукту.

К июлю 2000 г. в общей сложности компания «LAROX» поставила на заводы мира свыше 40 единиц пресс-фильтров. Они успешно работают на обогатительных фабриках, гидрометаллургических предприятиях, в каустизационных цехах, на производстве наполнителей и пигментов, в сахарной промышленности и др. Надежность и эффективность пресс-фильтров LAROX OY подтверждают и ведущие специалисты отечественных предприятий, на площадках которых установлено подобное оборудование: «Челябинский электролитный цинковый завод» и АО «Печенганикель».

Однако, несмотря на хорошие показатели разделения суспензий, возможность 100-процентной автоматизации и высокую экономичность фильтр-прессов, они не полностью используют свои ресурсы. Повышение эффективности работы автоматизированных фильтр-прессов достигается за счет грамотного подбора режимов их работы, при выборе которых необходимо учитывать закономерности протекания каждой операции в отдельности.

Процесс решения поставленной задачи требует использования как теоретического, так и экспериментального подходов. Они предусматривают всестороннее изучение

протекающих процессов, построение математической модели и производство расчетов на ее основе с последующей проверкой полученных результатов экспериментальным путем.

В ходе работы (совместно с кафедрой обогащения полезных ископаемых) произведен анализ разработанных ранее математических моделей процессов фильтрации, промывки и сушки, обобщение которых позволило составить подробный алгоритм расчета этих процессов.

Изучение процессов фильтрования, промывки и сушки строилось на основе системного анализа, предполагающего всестороннее исследование протекающих процессов на всех уровнях, начиная с микроуровня (взаимодействие отдельных частиц и их ассоциаций) и заканчивая объемом аппарата в целом.

В состав обобщенной математической модели вошли не только уравнения, описывающие гидродинамические особенности протекания вышеперечисленных процессов, но и условия тепломассообмена. Основным достоинством обобщенной модели является универсальность, т.е. возможность ее использования не только при расчете автоматизированных фильтр-прессов компании «LAROX», но и однотипного фильтровального оборудования иных фирм («OUTOKUMPU OY» (Финляндия), ФПАКМ (Украина).

Математическая модель процесса фильтрования суспензий учитывает возможность протекания режимов фильтрации с образованием осадка, а также режимов фильтрования с закупориванием пор фильтрующей перегородки.

Процесс промывки осадка во многом аналогичен фильтрованию. Особенно велика его роль в случае, когда необходимо максимально отмыть кек, а к концентрации компонента в фильтрате предъявляются пониженные требования.

Для стадии сушки с продувкой воздуха под давлением через фильтрационный слой на основании обобщения результатов многочисленных исследований была предложена полуэмпирическая математическая модель.

Для моделирования работы промышленных фильтровальных установок с эффективной поверхностью фильтрации от 9,5 до 144 $м^2$ использовался фильтр-пресс LAROX RF 0,1 H2 с гидравлическим приводом и площадью фильтрации 0,1 $м^2$ Работы проводились в соответствии с договором между компанией «LAROX» и Горным институтом (кафедра печей, контроля и автоматизации металлургического производства и кафедра обогащения полезных ископаемых).

Целью исследований являлось определение условий максимального снижения остаточной влажности кека при фильтрации и содержания твердой фазы в фильтрате, а также установление максимальной производительности фильтрации.

В ходе экспериментов исследованиям были подвергнуты суспензии медного, никелевого, медно-никелевого, цинкового и пиритного концентратов с исходным содержанием твердого в диапазоне 50-70 % по массе.

Эксперименты показали, что показатели фильтрования, полученные на пилотной лабораторной установке, хорошо моделируют результаты работы промышленных фильтр-прессов. В этой связи очевидно, что собранные экспериментальные данные можно использовать для проверки достоверности обобщенной математической модели, что является направлением дальнейших исследований.