

# ТОЧНОСТЬ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В МОДЕЛИ С ДЕЛЯЩИМИСЯ ПОТОКАМИ И ЦИРКУЛЯЦИЕЙ

Ариненков Ю.Д.

Кафедра ОПИ, факультет ЭМА, ДонГТУ

E-mail:opi@fizmet.dgtu.donetsk.ua

## **Abstract**

*Arinenkov Y.D. Accuracy of consecutive calculations in model with divided flows and circulation. Places of probable errors of sequential calculation with elements of the theory of turns of models of objects with divided flows and circulation are investigated.*

## **Введение**

Особенность промышленных непрерывных технологий состоит в наличии многих многомерных нелинейных процессов с делящимися потоками и циркуляциями, параметры которых оказываются сильно взаимосвязанными, что затрудняет контроль и управление ими без специальных моделей. К числу таких технологий относится, например, обогащение полезных ископаемых. Технология обогащения осуществляет разделение исходного материала, как правило, по крупности на несколько классов крупности и каждый класс крупности затем разделяется по плотности на два или три продукта -на концентрат и отходы, возможно, с выделением промежуточного продукта. Так поток исходного материала делится на несколько одновременно существующих потоков, которые затем проходят через различные аппараты и некоторые из этих потоков возвращаются в предыдущие точки технологической схемы, образуя циркуляции. Циркуляции могут нести в себе большое количество перерабатываемого материала и поэтому создают сильные перекрёстные связи в технологической схеме.

Известны многочисленные попытки осуществить моделирование таких технологических схем с разделением их на отдельные схемы, составлением балансовой системы уравнений для каждой из частей, использованием матричного представления, итерационных методов решения, составлением индивидуальных программ для множества типизированных технологических схем со специальными приёмами корректировки результатов моделирования отдельных циркуляций для устранения невязок материального баланса, как, например, в монографии [1], что снижает точность моделирования. Дело в том, что нередко циркуляции могут быть без самовывравнивания и в них по природе протекающих процессов не должно наступать равновесие между входом и выходом. По такой схеме в циркуляции фабрики накапливаются шламы, и расчётная схема должна отражать это явление правильно, а не скрывать невязку баланса. Кроме того, разделение сложной схемы на отдельные составляющие ведёт к потере существенных внутренних связей всей системы и, в результате, к неправильной интерпретации результатов моделирования. Таким образом, моделирование подобных технологических схем возводилось в ранг вычислительной проблемы.

Наиболее естественным было бы моделирование таких систем с помощью аналоговых вычислительных машин (АВМ) или многопроцессорных цифровых вычислительных машин (многопроцессорных ЦВМ). Однако, доступность по цене современных однопроцессорных ЭВМ делает их более предпочтительными для решения подобных задач, но при этом возникает необходимость дать обоснование сходимости последовательных вычислений к точному процессу в моделях систем с делящимися потоками и их циркуляцией. Такая задача рассматривается впервые.

### ***Постановка задачи***

Имеется сложная система из множества объектов с непрерывными многомерными (многокомпонентными) разделяющимися потоками и циркуляцией некоторых из них. Требуется доказать, что метод последовательных вычислений моделей объектов такой системы сходится к "точному гипотетическому".

### ***Метод решения задачи***

Для решения поставленной задачи воспользуемся методом индукции. Пусть имеется система в виде модели объекта с множеством разделяющихся потоков. Совершенно ясно, что порядок вычислений в такой модели не влияет на результат, при любом порядке вычисления этих потоков результат будет соответствовать точному  $V$  указанному смысле. Далее. Пусть имеется система в виде цепочки  $N$  последовательно соединённых моделей. Известно, что при прямом последовательном вычислении требуется  $N$  вычислений и результат соответствует точному в указанном смысле. При обратном порядке потребуется выполнить уже  $(4^2+N)/2$  вычислений, а при случайном порядке - даже  $N^N$ . Таким образом, для моделирования последовательной цепочки объектов приемлемо только прямое последовательное вычисление моделей объектов, т.е. очередь. Но циркуляция представляет собою именно последовательное соединение объектов, к тому же замкнутое в непрерывную последовательность. Следовательно, с учётом допустимости любого порядка вычислений разделяющихся потоков, в моделях систем с разделяющимися потоками и циркуляциями процесс вычислений по очереди сходится к "точному гипотетическому". Доказательство получено.

Для проверки полученного утверждения была поставлена задача с помощью имитационных исследований выяснить, где порождаются основные ошибки, в методе композиции применением элементов теории очередей в макромодели из моделей отдельных процессов или в самих моделях процессов.

### ***Постановка эксперимента***

Впервые попытка осуществить моделирование системы с разделяющимися потоками и циркуляцией в полном объёме, без разделения на отдельные части, была предпринята в работе автора [2], в которой были предложены методы корректного описания соответствующих технологических процессов с композицией макромодели всей технологии из отдельных объектов использованием элементов теории очередей и приведены положительные результаты такого моделирования. Однако, сходимость процесса к "точному гипотетическому" была ещё низкой. Так, по данным [2], на схеме средней сложности из 17 объектов невязка баланса за 7 часов функционирования моделирующей программы уменьшалась только до величины 10<sup>0,3</sup>%. Тщательное

изучение функционирования разработанной на этой основе макромодели позволило автору усовершенствовать её структуру до такой степени, что стал уместным вопрос соответствия примененного метода композиции моделей с делящимися потоками и циркуляциями точному, как в реальной технологии.

Поэтому макромодель для проведения эксперимента взята из обогащительной технологии [2], характеризующейся непрерывностью, наличием многих (в примере-36) нелинейных процессов с многомерными входами (3 класса крупности с 6 фракциями при описании 3 качественных показателей, всего 54 параметра), разделяющимися потоками и их циркуляцией. Общее количество определяемых и сохраняемых дробных значений составляет 6935, по которым вычисляются 665 суммарных параметров.

Все модели объединены в 9 типов с учётом не только их структуры, НО и выполняемых функций. Модель каждого процесса представлена описанием состава перерабатываемого материала и функции нелинейного преобразования этих характеристик.

Перерабатываемый материал уже по своему определению - объект переработки, и он должен быть представлен своей моделью, которая изменяется даже и тем более в процессе переработки этого продукта. Поэтому приемлемым остаётся единственный метод описания этих характеристик - интерполяция.

В специальной литературе по методам интерполяции имеется подробный анализ недостатков метода сплайнов и приёмов его улучшения. Здесь отметим недостаток этого метода, ранее никем не упоминавшийся - его функциональная необратимость. Этот недостаток проявится при сопоставлении графиков  $y(x)$  и  $x(y)$ , построенных по результатам интерполяции методом сплайнов одного и того же массива данных с малым количеством точек: графики будут совпадать только в экспериментальных (опорных) точках.

В работе автора [2] предложен метод рекуррентного *knot*-продолжения массивов данных, точных в своих точках, свободный от указанного недостатка. Метод опирается на принцип максимального правдоподобия, по которому наиболее вероятную дополнительную точку продолжения массива предлагается определить в центре тяжести доверительного треугольника, образованного стягивающей хордой анализируемого интервала массива и продолжениями хорд соседних интервалов. Метод особенно прост в применении к монотонной функции, каковой является гранулометрическая характеристика.

Для интерполяции данных фракционного состава, точных по площади интерполируемого интервала, в работе автора [2] обоснована целесообразность применения метода Макларрена [3]. По этому методу предписывается закрепить концы 2-кусочно-линейной функции посередине высот ступенек в начале и в конце интерполируемого интервала. Достоинство метода Макларрена видим в отказе от рассмотрения задачи интерполяции функцией с незакреплёнными концами. Правильность метода объясняем тем, что он даёт одинаковые результаты как при последовательности интерполяции слева направо, так и при интерполяции справа налево. В работе автора [2] этот метод дополнен до рекуррентного применения в программе построения фракционных характеристик. Существенная особенность этого метода, названного в работе [4] рекуррентным агальпродолжением массивов, проявляется в том, что итоговая характеристика проходит не посередине высот ступенек первичного графика по [3], а несколько смещается в ту или другую сторону и принимает предпочтительную плавную форму. Оба метода рекуррентного *knot*- и *area*-

продолжения массивов многократно применены в работе [4] при плазмировании поверхности непосредственно по массиву экспериментальных данных в методе форматирования массивов данных обогатимости.

В теории обогатительных процессов известно, что нелинейная сепарационная характеристика как модель технологического процесса преобразует характеристику частоты фракций исходного материала (как объекта переработки) либо уменьшением содержания в ней промежуточных фракций (в процессах дробления, измельчения), либо же разделением её на две части (в процессах сепарации с получением двух выходящих продуктов).

В последнем случае автор в эту функцию вводит дифференциальное условие экономико-технологической оптимальности процесса [2].

Точность реализации такого преобразования должна гарантировать, что ошибка баланса на выходе объекта не превысит величины 0,01%. Поэтому при вычислении характеристик разделительного процесса количество переменных увеличивалось до 729 с помощью метода форматирования массива данных [4] и по критерию эффективности разделения [2] вычислялись выходные параметры двух продуктов, размерность которых затем снова сокращалась до 54.

Так как макромоделю фабрики предназначалась для получения быстрых решений по анализу технологии при значительной инерционности реальных процессов (известно, что постоянные времени обогатительных объектов составляют от 2 до 30 минут и более), модели представлялись как статические и безинерционные. Нужно подчеркнуть, что поступающий на переработку в каждый процесс материал - это не вход объекта в традиционном представлении теории управления, а объект переработки и одновременно переменная рабочая среда процесса, придающая ему свойства нестационарности, особенно в переходных режимах запуска технологии.

При разработке алгоритма композиции макромоделей принималось, что в очередь на вычисления следует ставить объекты, подготовленные к этому, т.е. при наличии продукта на их входе. Однако, в технологической схеме есть объекты, выход которых является или конечным, или неявным, когда величину выхода определяет не сам объект, а другой потребитель ресурса этого объекта, например, отбор воды из бака оборотной воды, подачу реагентов в процесс и т.п.

Особенности постановки объектов в очередь можно формализовать некоторыми соглашениями, кратко и не полно перечисленными в работе автора [2]. В данной работе последовательная композиция макромоделей из набора типовых объектов выполнялась автоматически специальной программой в порядке перечисления продуктов в топологической схеме технологии на основании следующих соглашений по организации очереди:

1. Первым в список процессов устанавливается головной процесс.
2. Вторым в список устанавливается объект "TJUL", имеющий вход, но не имеющий выхода и предназначенный для пассивного контроля выхода макромоделей.
3. Следующими устанавливаются пассивные (обслуживающие) объекты - они имеют вход, но не имеют явного выхода. Функции их выхода исполняются по запросу объекта, владеющего вычислительным ресурсом. К таким объектам относятся устройства (регуляторы) подачи воды, реагентов, суспензии и др.
4. Остальные (активные) объекты перечисляются (нумеруются) в списке в произвольном порядке и порядковые номера рассматриваются как их адреса

5. Все активные процессы получают вычислительные ресурсы в порядке движения очереди, а пассивные объекты - по запросу нуждающихся в их функционировании активных объектов.
6. Выходные потоки одного процесса перечисляются сразу друг за другом (как родственные, как потомки одного объекта).
7. Объекты-адресаты устанавливаются в конец списка очереди в порядке перечисления адресуемых к ним продуктов исполняемого процесса.
8. Все объекты сохраняют массивы своих текущих выходных потоков.
9. Инициированные очередью к вычислительному процессу объекты вначале обнуляют свой вход-сумматор, а затем обеспечивают себя входной информацией путём поиска отправлений на свой адрес.

Этот перечень принятых соглашений о последовательности предоставления вычислительных ресурсов объектам макромоделей следует топологии реальной моделируемой схемы с отличием, заключающемся в том, что очередные объекты, в которые поступают продукты предыдущих процессов, моделируются не сразу, а только устанавливаются в очередь за вычислительным ресурсом, и эта очередь может значительно превышать количество моделируемых процессов вместе с их продуктами.

Объекты макроmodellирования - стилизованные мало-операционные схемы и схема ЦОФ "Киевская", представленная 24-мя технологическими процессами и 12-ю информационными станциями в различных точках технологической схемы.

### ***Основные результаты и применения***

Имитационное изучение макромоделей стилизованных схем позволило выявить реакцию моделей на сознательно вводимые топологические ошибки в таких схемах, проявляющуюся в существенном ухудшении кинетики перехода параметров макромоделей, и факт минимальной невязки баланса при рациональной топологии технологической схемы.

Такие наблюдения, например, показали, что отрицательная невязка баланса возникает при нарастании содержания твёрдого в оборотной воде, невязка становится пренебрежимо малой при стабилизации содержания твёрдого в оборотной воде и становится положительной при снижении содержания твёрдого.

Эти исследования показали также, что появление невязки материального баланса при рациональном изменении настроек процессов носит кратковременный, пиковый характер, в то время как нарушения технологии ведут к продолжительному изменению некоторых потоков и эти процессы как бы дифференцируются через невязку баланса.

Наконец, нужно отметить сильные взаимосвязи между различными параметрами процессов обогатительной технологии, делить такую технологию на якобы отдельные схемы недопустимо. Разработанная макромоделей позволяет изучать эти связи и принимать обоснованные решения по управлению технологией.

Можно утверждать, что разработанная макромоделей является эффективным средством изучения и совершенствования конкретной технологии.

Пример режима просмотра списка всех процессов для постановки конкретного процесса на полный контроль с возможностью настройки дан на рис.1.

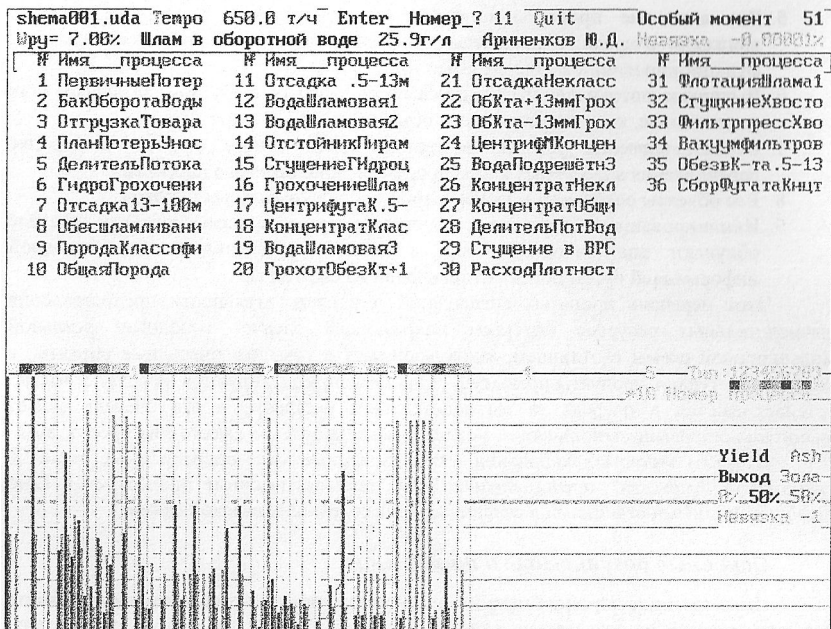


Рис. 1 - Дисплей в режиме выбора контролируемого процесса схемы ЦОФ "Киевская"

На этом рисунке в верхней части справа указано, что невязка материального баланса составляет 10<sup>-5</sup>%, содержание твёрдого в оборотной воде составляет 25,9 г/л. Любой процесс из представленного списка может быть поставлен на полноценный контроль, с выводом всех параметров на экран, включая параметры настройки объекта, и эти настройки могут быть оперативно изменены.

В нижней части рисунка представлены столбиковые диаграммы, позволяющие просмотреть сразу все параметры всей технологии. Для удобства распознавания принадлежности графика к конкретному процессу все столбиковые диаграммы сверху пронумерованы и, кроме того, промаркированы цветными метками, позволяющими по цвету распознавать тип объекта. В графиках отображены выход и зольность одного или двух продуктов.

Там же приведен график кинетики невязки материального баланса, из которого видно, что невязка устойчиво сходится к малой величине, и свидетельствует, что метод последовательной композиции макромодели в пределах до указанной невязки сходится к "точному гипотетическому".

Справа на графическом дисплее дана оцифровка цветовой маркировки типа процессов и показана ось нулевой невязки материального баланса.

После выбора контролируемого процесса открывается список параметров. После окончания ввода настроек параметров выбранного процесса открывается его цифровой дисплей. Дисплей в соответствующем режиме показан на рис.2.

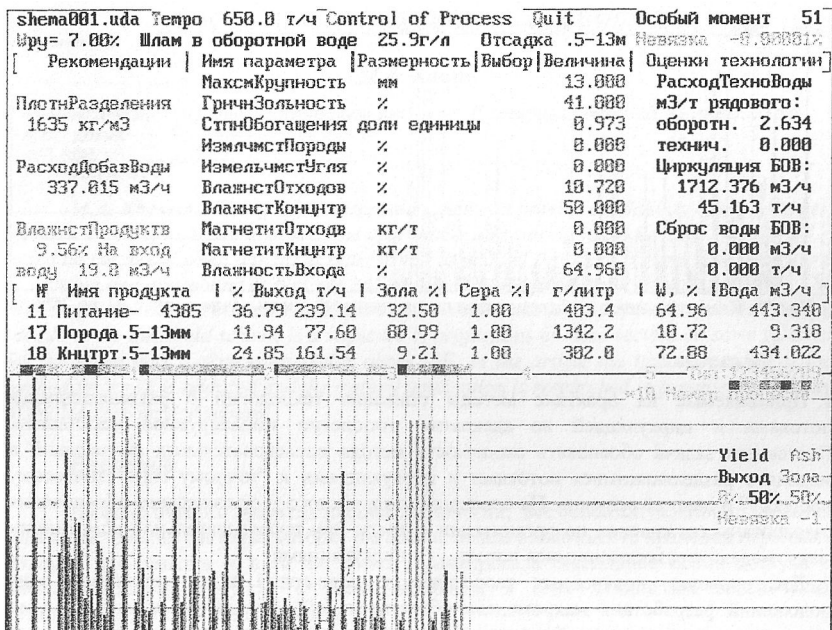


Рис.2 - Числовой дисплей контроля параметров процесса №11

По рисунку видно, что цифровой дисплей даёт исчерпывающую информацию не только по всем выходным параметрам процесса, но и по настройке самого режима обогащения, указывая также оптимальную плотность разделения и необходимую подачу дополнительной воды в процесс. Кроме того, вычисляется и выводится на экран суммарная влажность всех полученных продуктов обогащения, дается рекомендация на добавление воды в общую схему.

Одновременно выдается общая информация о состоянии водно-шламовой схемы: содержание твёрдого в оборотной воде, расход технической и оборотной воды, циркуляция этой воды.

Макромодель решает все задачи с минимизацией сброса воды в шламовые накопители, т.е. поддерживает экологически чистую технологию. Аналогично представляются и настраиваются все остальные модели процессов.

Как средство визуализации, графический дисплей облегчает контроль кинетики невязки баланса, которая позволяет судить об общем состоянии макромодели и о влиянии на него отдельных настроек. Так, изменение зольности разделения на каком-либо процессе сопровождается кратковременным отклонением невязки баланса.

Пример кинетики невязки баланса всей макромодели от изменения заданной зольности разделения с величины 41% на величину 20% только на одном процессе №11 "Отсадка 0,5-13мм" показан на рис.3.

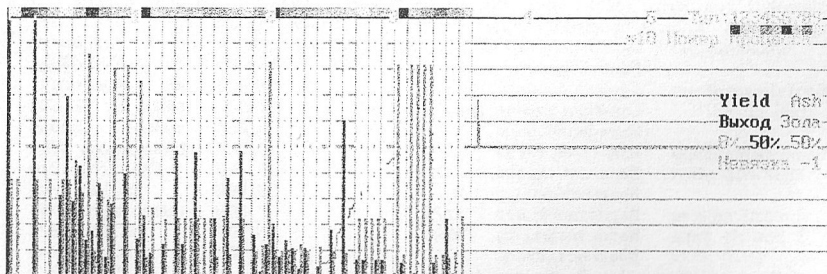


Рис.3 - Кинетика невязки баланса при снижении зольности разделения с41 до 20%

### **Выводы**

1. Применяемые на практике методы описания технологий с разделяющимися потоками и циркуляцией не адекватны топологии моделируемой технологии. Поставлена задача обосновать сходимость метода последовательных вычислений в модели с разделяющимися потоками и циркуляциями к "точному гипотетическому процессу" и дано её решение. На основании полученного теоретического обоснования разработаны соглашения по организации очереди при последовательной композиции макромоделей с разделяющимися потоками и циркуляциями.
2. Для проверки полученных теоретических положений и на основании этих положений разработана макро модель обогатительной технологии, имитационными экспериментами на которой установлено, что невязка материального баланса для подробно моделируемой технологии ЦОФ "Киевская" находится на уровне 10<sup>-5</sup>%. Полученные результаты не опровергают теоретического утверждения о сходимости процесса композиции макромоделей к "точному гипотетическому процессу".
3. Разработанная по результатам теоретического и имитационного исследования макро модель прошла экспертную проверку в условиях ЦОФ 'киевская" и используется как тренажёр в учебном процессе. Макро модель имеет библиотеку описания различных схем обогащения углей и может быть модифицирована под другие технологии с разделяющимися потоками и их циркуляциями.

### **Литература**

1. Шупов Л.П. Моделирование и расчёт на ЭВМ схем обогащения. М., 'Недра', 1980. 288с.
2. Arinenkov Y. Universal model for research both optimization of technological processes and circuits of coal preparation factories on the COMPUTER / 2nd Regional APCOM'97 Symposium on COMPUTER APPLICATIONS AND OPERATIONS RESEARCH III THE MWERAL INDUSTRIES. Published by: The Moscow State Mining University Publishing Center. Moscow, Russia - 1997. 536p., p.209-214.
3. W.Maclarren. A guarantie of performance for coal washing plant - Coll. Guard. Vol. CXLIII, pp/ 198-201; 375 (1931).
4. Ариненков Ю.Д. Метод форматирования массивов данных обогатимости полезных ископаемьге./"Наукові праці Донецького державного технічного університету". Випуск 16, серія гірничо-електромеханічна. Донецьк: ДонДТУ, 2000. С.3-10.