

**МАКРОМОДЕЛЬ СХЕМЫ ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ  
ТЕХНОЛОГИИ**

Ариненков Ю.Д., канд. тех. наук, доц.,  
Донецкий государственный технический университет

*Поставлена задача найти описание оптимальных режимов типовых процессов как блоков макромоделей схемы обогатительной фабрики и обосновать условие, при выполнении которого сцепление блоков сходится к заданной их композиции, и дано её решение постановкой каждого блока в очередь на вычисления на ЭВМ на каждом такте передачи данных о поступлении в него продукта.*

*Put problem to find a description of optimum modes of standard processes as blocks macromodels of scheme an coal preparation plant and motivate a condition, when performing which traction of blocks reconverges to given their compositions, and is given its decision by stating each block in the queue on calculations on PC on each tact of data base communications on the arrival in it product.*

Топология непрерывной технологической схемы обогащения полезных ископаемых представлена соединением множества машин и аппаратов, регулирующих и перерабатывающих проходящие через них последовательные, разделяющиеся, смешивающиеся потоки материалов и их циркуляции.

Необходимость правильного отражения топологии схемы в её модели очевидна, однако, удовлетворительное решение этой задачи не получено, возможно, по нескольким причинам.

Так, в монографии [1] обсуждается моделирование и расчёт схем обогатительной технологии на ЭВМ решением систем линейных уравнений сепаратных частей схем с корректировкой их невязок. Действительно, такой подход не позволяет учесть сложные нелинейные и переменные свойства объектов, а деление схемы на сепаратные части, с целью упрощения уже неполного её описания, ведёт к потере связей между ними.

Выходом из этого положения может быть композиция модели технологической схемы из адекватных моделей процессов, однако, трансляция такой модели для использования её на компьютере ещё не имеет удовлетворительного решения.

В работе [2] рассматривают и повременное моделирование с детерминированным или случайным шагом, и экономный позаявочный способ, но применение последнего ограничивают последовательными заявками на вычисления, так как в противном случае учёт их взаимодействия становится весьма затруднительным. Вопрос о преобразовании исходной последовательности заявок в предпочтительную не ставится. Между тем, решение этих и подобных вопросов снимет проблему синтеза макромоделей схемы обогатительной технологии.

### **Постановка задачи**

Вопросы выбора предпочтительного описания объектов схемы в виде блоков модели относятся к конкретной предметной области.

Для обогатительной технологии эти вопросы, в принципе, требуют уточнения и дальнейшего развития в направлении решения их на современной вычислительной технике на основе применения предложенных в работе [3] специальных методов продолжения массивов исходных данных ситового и фракционного анализов до таких размеров, что к ним становится применимой кусочно-линейная интерполяция, и тогда характеристики исходного материала оказываются как бы описанными функциями общего вида.

Вопрос композиции блоков модели в соответствии с топологией моделируемой технологической схемы связан не с особенностями самой схемы, а со способом осуществления заданной композиции на однопроцессорной ЭВМ, работающей только последовательно.

Прямое последовательное обслуживание блоков модели схемы вычислительным процессом на ЭВМ назовём катенацией (*catanation* - взаимная причинная связь, каскадное соединение) связей блоков. Макромоделью будем называть катенацию большого (очень большого, бесконечного) количества блоков.

Поэтому здесь ставится задача дать описание характеристик продуктов обогащения процессов (для построения типовых блоков модели) с помощью функций общего вида и обосновать условие, при выполнении которого катенация блоков макромоделей сходится к заданной композиции, соответствующей топологии технологической схемы обогатительной фабрики.

### **Метод решения задачи**

Характеристики обогатимости продуктов сепарации являются результатом разделения характеристики обогатимости исходного материала на две части. Для угля такое разделение выполняется по плотности частиц, соответствующей их оптимальной зольности.

В качестве исходных данных для расчёта принимаются:  $\lambda_0$  - заданная зольность разделения;  $\gamma_{и}(\lambda)$  - фракционная характеристика исходного продукта как зависимость выхода всплывшего в тяжёлой жидкости продукта от зольности элементарных фракций  $\lambda$  исходного продукта;  $\gamma_{кт}(\lambda)$  - выход концентрата теоретического, определяется через  $\lambda_0$  по  $\gamma_{и}(\lambda)$ ;  $\gamma_{и}(\lambda_{\max})$  - полный выход исходного продукта, включающий в себя фракцию с максимальной зольностью  $\lambda_{\max}$ , причём, всё в долях единицы.

На основании этих определений фракционная характеристика наихудшего концентрата определится как

$$\gamma_{кн}(\lambda) = \gamma_{и}(\lambda) \cdot \gamma_{кт}(\lambda_0) \cdot \gamma_{и}^{-1}(\lambda_{\max}), \quad (1)$$

фракционная характеристика теоретического концентрата будет

$$\gamma_{кт}(\lambda) = 0,5 \cdot \{ \gamma_{и}(\lambda_0) + \gamma_{и}(\lambda) - | \gamma_{и}(\lambda_0) - \gamma_{и}(\lambda) | \}, \quad (2)$$

где обозначено:  $\gamma_{кн}(\lambda)$  - наихудшая зависимость выхода концентрата от зольности разделения;  $\gamma_{кт}(\lambda)$  - теоретическая (лабораторная) зависимость выхода концентрата от зольности разделения.

Эти две функции достаточны для определения максимальных ошибок извлечения фракций как их разницы по формуле

$$H(\lambda) = \gamma_{кт}(\lambda) - \gamma_{и}(\lambda) \cdot \gamma_{и}(\lambda_0) \cdot \gamma_{и}^{-1}(\lambda_{\max}), \quad (3)$$

где  $H(\lambda)$  - функция наибольших возможных ошибок извлечения  $\lambda$ -ной фракции, доли единицы.

Предлагается следующая **Теорема**: Пусть дана функция наибольших ошибок извлечения  $H(\lambda) = \gamma_{кт}(\lambda) - \gamma_{и}(\lambda) \cdot \gamma_{и}(\lambda_0) \cdot \gamma_{и}^{-1}(\lambda_{\max})$ . Тогда при заданной зольности разделения  $\lambda_p$  как  $H(\lambda_p) = \gamma_{и}(\lambda_p) - \gamma_{и}^2(\lambda_p) \cdot \gamma_{и}^{-1}(\lambda_{\max})$  она является своим максимумом, т.е.  $H(\lambda_p) = \max H(\lambda)$ .

**Доказательство**: Пусть  $\xi$  - малое положительное число,  $\xi \rightarrow 0$ . Если  $\lambda = \lambda_p - \xi$ , то на основании зависимости (3) с учётом формулы (2)

$$\frac{dH(\lambda_p - \xi)}{d\lambda} = (1 - \gamma_{и}(\lambda_p) \cdot \gamma_{и}^{-1}(\lambda_{\max})) \cdot \frac{d\gamma_{и}(\lambda_p - \xi)}{d\lambda} > 0.$$

Если  $\lambda = \lambda_p + \xi$ , то на основании зависимости (3) с учётом формулы (2) производная

$$\frac{dH(\lambda_p + \xi)}{d\lambda} = - \gamma_{и}(\lambda_p) \cdot \gamma_{и}^{-1}(\lambda_{\max}) \cdot \frac{d\gamma_{и}(\lambda_p + \xi)}{d\lambda} < 0.$$

Как видим, при варьировании аргумента  $\lambda$  по возрастанию от  $\lambda_{\min}$  до  $\lambda_{\max}$  производная функции  $H(\lambda)$  меняет свой знак с положи-

тельного на отрицательный. Значит, в точке при  $\lambda = \lambda_p$  функция  $H(\lambda)$  всегда принимает максимальное значение  $\max H(\lambda)$ , которое по определению функции  $H(\lambda)$  равно

$$H(\lambda_p) = \gamma_n(\lambda_p) - \gamma_n^2(\lambda_p) \cdot \gamma_n^{-1}(\lambda_{\max}). \quad (4)$$

Теорема доказана.

Знание этой теоремы позволяет обоснованно нормировать ошибки разделения и на этой основе дать описание фракционной характеристики для реального продукта обогащения.

Принцип селективного разделения предполагает, что все фракции попадают в свои продукты полностью, без взаимного засорения, за исключением фракций, прилегающих к границе разделения и потому разделяемых не селективно (с перемешиванием) и так, что функция ошибок отсекается от функции допустимых ошибок ординатой  $H(\lambda_p) \cdot E_s$ , и тогда ошибка (потеря) фракции будет представлена следующей функцией:

$$h_s(\lambda) = 0,5 \cdot \{H(\lambda) - H(\lambda_p) \cdot E_s + |H(\lambda) - H(\lambda_p) \cdot E_s|\}, \quad (5)$$

где  $h_s(\lambda)$  - ошибка (потеря) фракции;  $E_s$  - показатель эффективности разделения [3],  $0 < E_s < 1$ ; функции допустимых ошибок  $H(\lambda)$  и  $H(\lambda_p)$  вычисляются по формулам (3) и (4) соответственно.

Теперь, с помощью полученных формул (2) и (5), фракционную характеристику концентрата  $\gamma_k(\lambda)$  можно представить функцией

$$\gamma_k(\lambda) = \gamma_{кт}(\lambda) - h_s(\lambda). \quad (6)$$

Этот набор функций достаточен для описания оптимальных режимов обогащения по заданной оценке  $E_s$ . При моделировании процессов с учётом влияния и не оптимальных настроек факторов строится экспериментальная зависимость  $E_s(x)$ , где  $x$  - вектор контролируемых аргументов модели, и уже по ней вычисляется (5).

Эвристическое решение задачи катенация блоков макромоделей технологической схемы обогатительной фабрики предложено автором в работе [3]. Согласно этому предложению, вычислительные ресурсы от объекта к объекту должны передаваться по очереди в соответствии со специальными правилами. Эти правила исключают акт катенации для некоторых блоков определённого типа, адресуя их выход в "NUL" (в никуда); например, таковыми являются отгрузка готовой продукции, бак оборотной воды, унос пыли и другие потери.

Докажем, что катенация блоков модели сложной схемы как прямая последовательность их причинно-следственных связей соответствует её композиции по топологии сложной технологической

схемы. Для этого рассмотрим два варианта стилизованных схем соединений объектов, которые показаны на рис. 1.

При решении поставленной задачи мы воспользуемся методом индукции. Положим, имеется система в виде модели объекта с множеством разделённых потоков (продуктов этого объекта) и принимающих эти потоки  $n$  объектов, рис.1,а. Ясно, что при любом порядке вычисления всех моделей принимающих  $n$  объектов результаты будут соответствовать заданной композиции моделей.

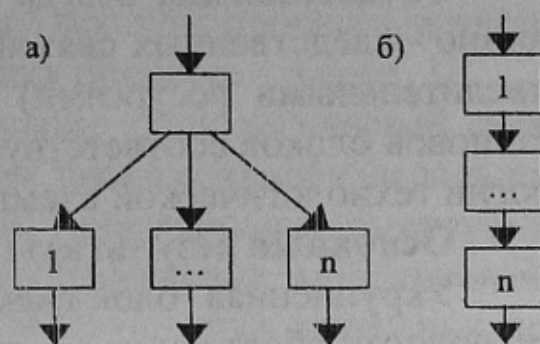


Рис.1-Независимое (а) и последовательное (б) соединение блоков

Далее. Пусть имеется система в виде цепочки  $n$  последовательно соединённых моделей, рис.1,б. Потребное количество вычислений найдём следующим образом. Известно, что число всех перестановок из  $n$  различных элементов составляет  $P_n = n!$ . Среди всех этих перестановок есть такая (лучшая для катенации), что элементы в ней расположены в прямой последовательности и поэтому количество вычислений блоков составит точно  $n$ , есть такая, что элементы в ней расположены в обратной последовательности и поэтому количество вычислений блоков составит точно  $(n^2+n)/2$ , а в худшем случае  $n^n$ .

В результате имеем соотношение оценок количества вычислений объектов при прямой, обратной и случайной катенации в виде неравенства

$$n < (n^2+n)/2 < n^n \text{ для } n \geq 2.$$

Сопоставление рядов этих вариантов для различных значений  $n$  показано в табл.1.

Табл.1 - Варианты рядов

$n$	$(n^2+n)/2$	$n^n$
2	3	4
3	6	27
4	10	256
5	15	3125
6	21	46656
7	28	823543
8	36	16777216
9	45	387420489

Из этой таблицы хорошо видно, что, если допущена ошибка катенации, то исправить её повторением случайных равномерно распределённых попыток практически невозможно, так как  $n^n$  - это сверх большое ( $\infty$ -разрядное) число, ибо в реальных технологических схемах всегда присутствуют циркуляции и нужно полагать  $n \rightarrow \infty$ . Именно по этой причине

какая-либо ошибка в катенации причинно-следственных связей недопустима.

Следовательно, всегда катенация как последовательность причинно - следственных связей (в форме очереди блоков модели за вычислительными ресурсами) предпочтительнее любых других перестановок блоков соответствует заданной композиции блоков по топологии технологической схемы. Доказательство получено.

### Основные результаты и применения

Укрупнённая блок-схема макромоделей сложной непрерывной технологии обогащения полезных ископаемых показана на рис.2.

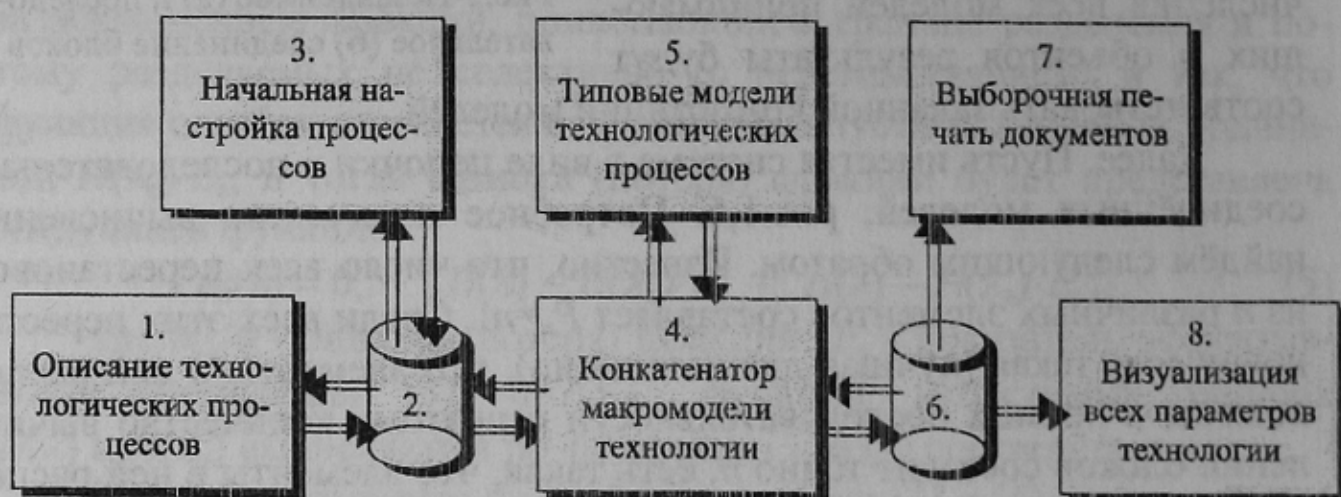


Рис.2 - Блок-схема макромоделей сложной обогатительной технологии

В представляемой блок-схеме блоки номер 2 и 6 - это файлы данных о конкретной технологической схеме, хранимые на жестком диске, а остальные все блоки представляют собою неизменные, одинаковые для различных технологических схем, исполняемые exe-файлы. Первый из них блок 1 в интерактивном режиме поддерживает описание конкретной технологической схемы. При трансляции модели запрашиваются данные об этой схеме в следующем порядке:

<Адрес\_1> <Имя процесса> <Тип> <Номер> <Имя продукта> <Адрес\_2>.

По типу процесса распознается количество продуктов у данного процесса, и если их два, то в следующей строке выдается запрос по второму продукту:

<Номер+1> <Имя продукта> <Адрес\_3>.

По существу, эти два предложения образуют простой язык программирования описания технологической схемы обогащения. При этом <Адрес\_1> процесса задаётся автоматически, <Имя процесса>

выбирается по номеру из технологической схемы, номера продуктов тоже задаются автоматически, в качестве <Адрес\_2> указывается адрес (подобно <Адрес\_1>) принимающего продукт процесса, а учётом <Тип> процесса обеспечивается катенация процесса <Адрес\_3>.

Составленное таким образом описание технологической схемы хранится на жёстком диске 2, на котором также сохранён массив данных перерабатываемого материала. Блок 3 обеспечивает быструю начальную настройку процессов, без осуществления моделирования всей макромоделли. При запуске блока 4 начинается катенация причинно-следственных связей макромоделли технологии: по очереди из блока 2 вызывается головной процесс №1 и читается его описание, по указанному там типу вызывается типовая модель этого процесса, в неё загружается питание, синтезируются подробные характеристики выходных продуктов, которые подпрограмма обработки данных визуализирует их как в числовой, так и в графической форме на видеомониторе, сохраняет их в блоке 6 и затем блок 4 продолжает катенацию - устанавливает адрес назначения первого продукта в конец текущей очереди, если этот адрес не "NUL", или не изменяет длину катенации, если этот адрес "NUL".

Если есть второй продукт, то снова продолжается катенация: адрес следующего процесса-приёмщика продукта устанавливается в теперь уже продолженную на 1 очередь, если этот адрес не "NUL", или не изменяет длину катенации, если этот адрес "NUL". Затем, так как первый объект уже будет обслужен, очередь будет смещена на один шаг в сторону её укорочения и процесс катенации повторится аналогичным образом для первого указанного в продвинутой очереди на вычисления обогатительного процесса.

Составление описания технологической схемы рассмотрим на простейшем варианте соединения 5 процессов с одной циркуляцией, показанных на рис.3.

Согласно этой схеме, исходный продукт 1 поступает на основное грохочение, после которого мелкий продукт 2 поступает на отсадку, где делится на концентрат 4 и породу 5 и эти оба продукта сразу поступают в отгрузку. Крупный продукт 3 идёт на дробление, мелкий продукт 6 идёт на блок 4 - контрольное грохочение. Мелкий продукт 7 направляется на отсадку, а крупный 8 поступает на дробление. Так в результате нечёткого дробления в блоке 3 возникает циркуляция крупного продукта 8.

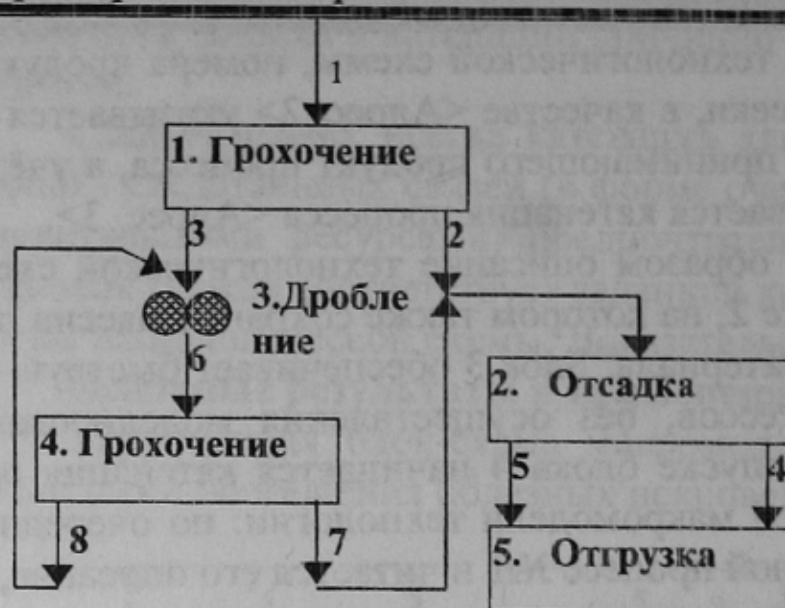


Рис.3 - Простейшая схема с циркуляцией

программе, но и количество продуктов у каждого процесса, и указывается адрес назначения каждого из этих продуктов, что позволяет формализовать катенацию очереди процессов в порядке поступления в них продуктов, т.е. в порядке их причинно-следственных связей, по очереди [3].

Табл.2 - Описание технологической схемы

Технологический процесс			Продукт переработки		
Адрес	Наименование технологического процесса	Тип	Номер	Наименование продукта переработки	Адрес
1	Грохочение основное	5	2	Мелкий пр.	2
			3	Крупный пр.	3
2	Отсадка	6	4	Отходы	5
			5	Концентрат	5
3	Дробление	3	6	Дробленный	4
4	Грохочение контрольное	5	7	Мелкий пр.	2
			8	Крупный пр.	3
5	Отгрузка	4	9	Отгрузка	Nul

Табл.3 - Очередь

№	Процесс
1	1. Грохочение
2	2. Отсадка
3	3. Дробление
4	5. Отгрузка
5	5. Отгрузка
6	4. Грохочение
7	2. Отсадка
8	3. Дробление
9	5. Отгрузка
10	5. Отгрузка
11	4. Грохочение

Составление очереди процессов по табл.2, в зависимости от принятого в ней порядка нумерации продуктов этих процессов, оказывается  $2^s$ -вариантной задачей, где  $s$  - количество 2-продуктовых процессов, в которой все варианты одинаково верные, нет среди них предпочтительного. Например, в технологической схеме ЦОФ "Киевская" имеется 22 2-х продуктовых процесса, так что количество возможных вариантов описания этой схемы составит  $2^{22}=36614464$ .



Для устранения этой бесполезной вариантности предлагается ранжировать продукты сепарационных процессов по отношению к заданному фактору разделения: если продукт преодолевает заданную границу фактора разделения, то он получает ранг 1, иначе - 2.

По результатам выполненных исследований разработана макро-модель технологической схемы ЦОФ "Киевская". Дисплей созданной макро-модели показан на рис.4.

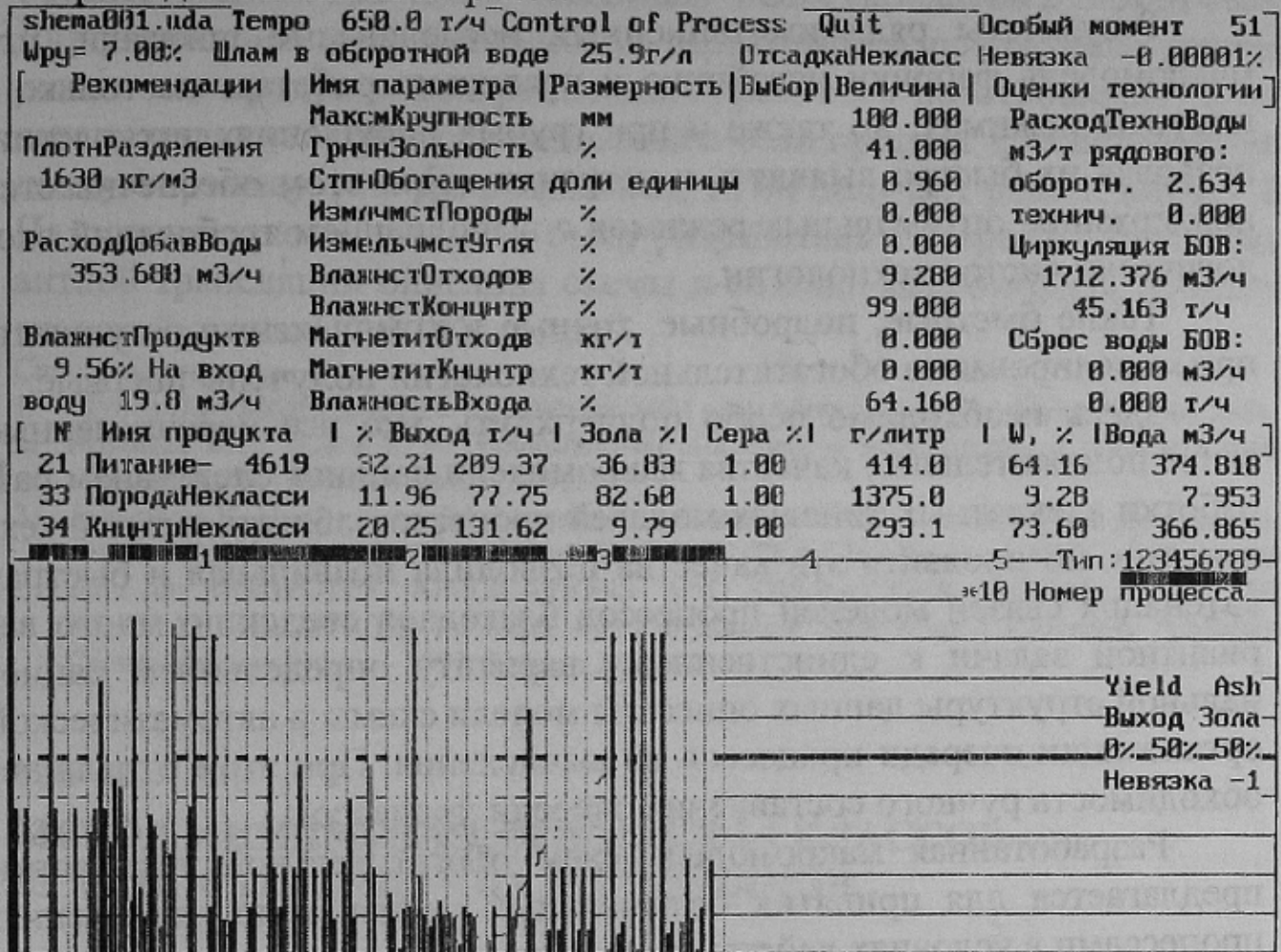


Рис.4 - Дисплей макро-модели технологической схемы

Для условий ЦОФ "Киевская" макро-модель технологической схемы включает в себя 24 технологических процесса и 12 информационных станций (пультов). На дисплей макро-модели выводятся 26 общих для технологической схемы параметров, 53 параметра по любому контролируемому через дисплей процессу, 108 столбиковых диаграмм выходных параметров по каждому продукту каждого процесса и один график невязки материального баланса по всей обогатительной фабрике.

В режиме просмотра всей технологии на экран предварительно выводится список всех процессов, а после выбора конкретного процесса предоставляется доступ к перенастройке параметров его моде-

ли. После этого на экран выводятся подробные параметры этого процесса - по входу и одному или двум выходам.

По выбору на просмотр или на печать предоставляются дробные и суммарные данные по характеристикам всех продуктов в 95 таблицах в общем количестве 5985 значений. Кинетический переход параметров макромодели на процессоре 386 завершается за 2 минуты с невязкой материального баланса  $10^{-5}\%$ .

Результаты ряда имитационных исследований показали, что макромодель фабрики устойчиво и правильно работает не только в штатных режимах, но также и при грубых нарушениях технологии, позволяя их быстро выявлять и устранять. При этом обеспечивается поддержание оптимальных режимов с выполнением требований экологически чистой технологии.

Такие быстрые, подробные, точные и комплексные результаты при моделировании обогатительной технологии получены впервые.

Здесь необходимо особо подчеркнуть, что все перечисленные выше положительные качества макромодели явились следствием разработки адекватных типовых моделей процессов обогатительной технологии, но проявить эти качества позволила правильная и быстрая катенация связей моделей процессов благодаря сведению многовариантной задачи к единственному варианту определением рациональной структуры данных описания модели схемы и автоматической организации очереди процессов на вычисления. При этом отпала необходимость ручного составления очереди процессов.

Разработанная макромодель схем обогатительной технологии предлагается для принятия оптимальных решений по управлению процессами в условиях действующего предприятия.

### **Выводы**

Наличие в технологической схеме обогатительной фабрики разделяющихся потоков и циркуляций затрудняет разработку её модели. Поставлена задача дать описание характеристик продуктов обогащения процессов (для построения типовых блоков модели) с помощью функций общего вида и обосновать условие, при выполнении которого катенация блоков макромодели сходится к заданной композиции, соответствующей топологии технологической схемы обогатительной фабрики. Предложен последовательный ряд функций описания оптимальных режимов обогащения по заданной оценке селективности разделения  $E_s$  для применения их в структуре типовых моделей обогатительных процессов как блоков технологической схемы. Показано,

что катенация связей блоков модели как прямая последовательность причинно-следственных связей объектов с поступающими в них продуктами (очередь) всегда предпочтительнее любых других перестановок блоков соответствует заданной композиции блоков по топологии технологической схемы. Показано, что при этом есть  $2^s$  равноценных вариантов её выполнения, где  $s$  - количество 2-продуктовых объектов схемы. Для ЦОФ "Киевская" таких вариантов  $2^{22}=36614464$ . Для устранения этой бесполезной вариантности предложено ранжировать все продукты сепарационных процессов по отношению к величине заданного фактора разделения: если продукт преодолевает заданную границу фактора разделения, то он получает ранг 1, иначе - 2. На основе такого признака была разработана программа одновариантной трансляции описания схемы и создана макро модель технологической схемы ЦОФ "Киевская".

Список источников.

1. Шупов Л.П. Моделирование и расчёт на ЭВМ схем обогащения. М., "Недра", 1980. 288с.
2. Йозайтис В.С., Львов Ю.А. Экономико-математическое моделирование производственных систем. М.: Высшая школа, 1991.
3. 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 IN THE MINERAL INDUSTRIES. Published by: The Moscow State Mining University Publishing Center. Moscow, Russia - 1997. 536p., p.209-214.

УДК 622.7.001

## МЕТОД МИНИМИЗАЦИИ МАССИВА КЛАССОВ КРУПНОСТИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Ариненков Ю.Д., канд. тех. наук, доц.,

Донецкий государственный технический университет

*Поставлена задача минимизации массива классов крупности сыпучих материалов при выполнении гранулометрического анализа путём сравнения сочетаний сокращения массивов классов со стандартным набором по величинам интегральной и максимальной ошибок и дано её решение с описанием числовых функций характеристик knot-продолжением массивов экспериментальных данных на ЭВМ.*

*Problem of a file of size of classes of materials is put at fulfilment of the analysis of the size of structure by comparison of combinations of reduction of files of classes with a standard set on sizes of integrated and maximum errors and her decision with the description of numerical functions of*