УДК 665.633

Г.И.АНКУДИНОВ, *д-р техн. наук, профессор, gankoudi@mail.ru*
И.Г.АНКУДИНОВ, *канд. техн. наук, доцент, ivgank@rambler.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

G.I.ANKUDINOV, *Dr. in eng. sc., professor, gankoudi@mail.ru*
I.G.ANKUDINOV, *PhD in eng. sc., associate professor, ivgank@rambler.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

КОМБИНАТОРНЫЙ СИНТЕЗ ГИБКИХ ПОТОЧНЫХ СХЕМ ОБОГАЩЕНИЯ РУД

Рассматривается применение логико-комбинаторного подхода к перечислению и синтезу гибких поточных технологических схем обогащения руд. Множество возможных схем обогащения представляется сначала в неявном виде как суперструктура, обобщающая знания об области синтеза. Для построения гибких схем обогащения руд такие схемы должны иметь оптимальный уровень избыточности, позволяющий оперативно перенастраивать их в соответствии с экономической целесообразностью. Предлагаются алгоритмы для порождения поточных схем с разным уровнем избыточности.

***Ключевые слова*:** обогащение руд, гибкие поточные схемы, логико-комбинаторный подход, синтез, перечисление.

COMBINATORIAL SYNTHESIS OF FLEXIBLE FLOWSHEETS FOR ORE ENRICHMENT

Application of logical-combinatorial approach for enumeration and synthesis of flexible ore enrichment flowsheets is considered. The set of possible enrichment flowsheets is represented at first implicitly as the superstructure generalizing knowledge of the area of synthesis. For creation of flexible ore enrichment flowsheets such flowsheets have to have the optimum level of redundancy allowing quickly to recustomize them according to economic feasibility. Algorithms for generation of flowsheets with different level of redundancy are offered.

***Key words*:** ore enrichment, flexible flowsheets, logical-combinatorial approach, synthesis, enumeration.

Создание технологий глубокого обогащения руд является актуальной проблемой эффективного использования природных ресурсов России. Эта проблема имеет еще одну грань, связанную со скудными запасами редкоземельных металлов: галлия, индия и селена. Редкоземельные металлы используются в высокотехнологичной промышленности и добываются, как правило, в виде побочных продуктов получения основных промышленных металлов (алюминия, меди и цинка). Для эффективного использования минерального сырья целесообразно рассмотреть все возможные схемы получения основных металлов, извлечения редкоземельных металлов, включая переработку уже имеющихся запасов (отвалов).

В работе рассмотрена возможность приложения логико-комбинаторного подхода [1-6] к комбинаторному синтезу гибких, перенастраиваемых поточных технологических схем обогащения руд. Построение эффективной технологии получения конечных продуктов обогащения требует рассмотрения всевозможных допустимых сочетаний механических, физических, химических, физико-химических или иных методов воздействия на исходные и промежуточные

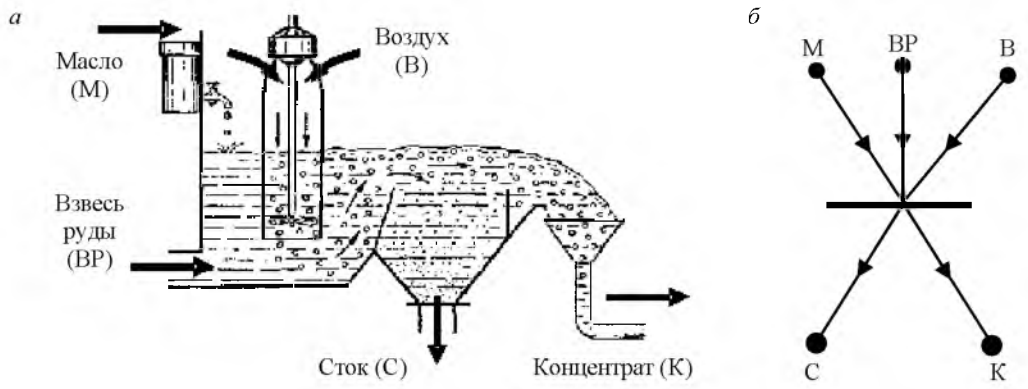


Рис.1. Схема флотационной установки (*а*) и ее представление в виде операционного блока с соответствующими входными и выходными потоками (*б*)

продукты. Для получения целевых продуктов обогащения с заданным качеством руда подвергается технологическим воздействиям посредством некоторого числа различных операционных блоков, соединенных в соответствующую поточную схему. Таким образом, задача синтеза эффективной технологической схемы обогащения руды носит комбинаторный характер.

Для постановки такой задачи целесообразно использовать модель, основанную на использовании потоковых И-ИЛИ-графов, которая в 1980-е гг. рассматривалась в задачах структурного синтеза потоковых схем любой природы [1, 2]. Потоковый И-ИЛИ-граф – это двудольный граф $G_F = \langle S \cup F, R_{SF} \cup R_{FS} \rangle$, где S – множество ИЛИ-вершин; F – множество И-вершин; R_{SF} – множество дуг $(s, f) \subset S \times F$; R_{FS} – множество дуг $(f, s) \subset F \times S$. Множество S – это множество всевозможных потоков энергии, вещества или информации, а множество F – это элементарные (на рассматриваемом уровне абстракции) преобразования потоков из S. В приложении к синтезу поточных схем обогащения руд множество F – это блоки, выполняющие технологические операции обогащения: дробление, фильтрацию, флотацию, промывку породы, магнитное и гравитационное воздействие и т.п. (рис.1), а S – это потоки сырья, промежуточных и целевых продуктов.

В работах [1, 2] потоковый И-ИЛИ-граф, обобщающий знания о всевозможных вариантах структуры на определенном уровне абстракции, например на уровне функционального описания, был назван максимально-избыточной структурой. В 1970-х гг. авторы работы [9] использовали понятие обобщенной структуры, которое определялось как функционально-избыточная качественная модель, отображающая многообразие возможных вариантов структуры проектируемой системы. Авторы [8] сформулировали системно-морфологический подход, в основе которого использование комбинаторных файлов для представления комбинаторной природы научно-технических достижений, в том числе в задачах синтеза потоковых технологических схем (процессных сеток). Комбинаторный файл получается путем гибридизации, т.е. наложения друг на друга признаков известных на данный момент решений (конструкций).

Для синтеза поточных схем химических и аналогичных производств авторы [10-13] использовали методологию, основанную на представлении технологических процессов посредством P-графов (P-graph methodology). В соответствии с этой методологией знания о структурных вариантах поточных схем представляются в виде суперструктуры, или максимальной структуры (superstructure). В дальнейшем для синтеза поточных схем нашел применение математический аппарат логики высказываний.

Методология P-графов ничем не отличается от методологии, основанной на использовании потоковых И-ИЛИ-графов.

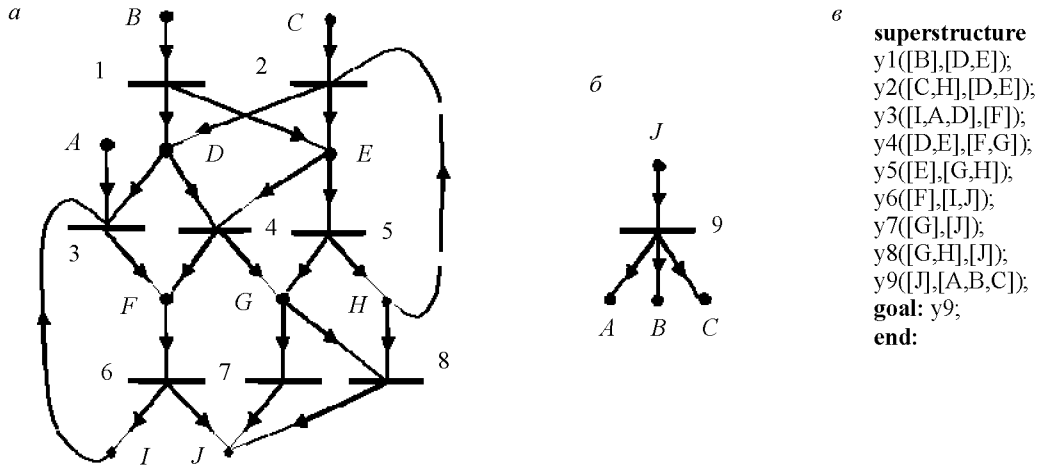


Рис.2. Алгоритм структурного цикла: *а* – суперструктура для получения целевого продукта *J* из набора исходных продуктов (сырья) {*A*, *B*, *C*}; *б* – «внешняя среда»; *в* – запись исходных данных на входном языке программы

Термины обобщенная структура, максимально-избыточная структура, комбинаторный файл и суперструктура означают одно и то же в рамках системно-морфологического подхода. В дальнейшем будем использовать последний термин как наиболее краткий. В работах [1, 2] был предложен логико-комбинаторный подход к структурному синтезу объектов любой природы, основанный на использовании скобочных форм логики высказываний для представления суперструктур. В публикациях [3-6] предлагается развитие логико-комбинаторного подхода, а в работе [7] – его применение для синтеза поточных схем добычи и переработки минерального сырья.

Рассмотрим использование алгоритма A_1, описанного в работе [2, с.47-54], для порождения множества работоспособных вариантов поточных схем (суперструктур). В работе [2] доказана теорема о том, что в случае многовыходных операционных блоков алгоритм A_1 порождает все неизбыточные, т.е. минимальные по составу варианты, а также некоторое число избыточных вариантов, причем возможен повторный вывод некоторых вариантов. Авторами настоящей статьи разработана программа ssf2012, в которой заложено несколько алгоритмов структурного синтеза. Алгоритм A_1, реализованный как алгоритм ssf2012-UUE, позволяет перечислить варианты поточных схем, причем каждый вариант представляется в виде списка операционных блоков, его составляющих.

Возможности алгоритмов логико-комбинаторного синтеза для построения вариантов поточных схем обогащения демонстрирует пример суперструктуры (рис.2, *а*). Начиная с первых работ [1, 2], синтезируемый объект рассматривался как открытая система, замкнутая на «внешнюю среду» таким образом, что входы синтезируемого объекта являются выходами «среды», а выходы синтезируемого объекта – входами «среды». Поэтому на рис.2, *б*, представлено дополнение суперструктуры в виде операционного блока 9, представляющего «внешнюю среду» для рассматриваемой задачи структурного синтеза поточной схемы. На рис.2, *в* представлена также запись исходных данных рассматриваемой задачи на входном языке экспериментальной программы ssf2012. Ключевые слова **superstructure** и **end** ограничивают начало и конец записи исходных данных. Для операционных блоков 1, …, 9 использованы обозначения $y1$, …, $y9$. В описании каждого операционного блока в скобках указаны списки входных потоков и выходных потоков. Ключевое слово **goal** выделяет «среду» $y9$. Результат работы алгоритма ssf2012-UUE для рассматриваемого примера следующий:

{[y2, y5, y8, y9], [y1, y5, y8, y9], [y2, y5, y7, y9],
[y1, y5, y7, y9], [y1, y4, y7, y9], [y2, y4, y5, y6, y9],
[y1, y4, y6, y9,], [y2, y3, y5, y6, y9],
[y1, y3, y6, y9]}.

Таким образом, суперструктура на рис.2, *а* представляет девять неизбыточных (минимальных) вариантов.

Алгоритм ssf2012-UUP, заложенный в программу ssf2012, преобразует исходные данные задачи синтеза потоковой схемы в логическое выражение, описывающее множество вариантов синтезируемой схемы в базисе {И, ИЛИ, НЕ}, причем обозначения блоков y_i $(i \in 1:n)$ используются в качестве соответствующих логических переменных:

$$f(y_1, \ldots, y_n) =$$

$$= y_n \bigwedge_{i \in 1:n} \left(\overline{y}_i \vee \bigwedge_{s \in in(y_i)} \bigvee_{j \in 1:n \,\&\, s \in ex(y_j)} y_j \right) \wedge$$

$$\wedge \bigwedge_{i \in 1:n} \left(\overline{y}_i \vee \bigvee_{s \in ex(y_i)} \bigvee_{j \in 1:n \,\&\, s \in in(y_j)} y_j \right).$$

Здесь $in(y_i)$ и $ex(y_i)$ – множества входов и выходов блока y_i соответственно. Выражение $\overline{y}_i \vee \bigwedge_{s \in in(y_i)} \bigvee_{j \in 1:n \,\&\, s \in ex(y_j)} y_j$, равносильное $y_i \to \bigwedge_{s \in in(y_i)} \bigvee_{j \in 1:n \,\&\, s \in ex(y_j)} y_j$, где $\to$ – логическая импликация, есть условие получения всех вариантов активизации входов блока y_i $(i \in 1:n)$. Аналогично выражение $\overline{y}_i \vee \bigvee_{s \in ex(y_i)} \bigvee_{j \in 1:n \,\&\, s \in in(y_j)} y_j$ есть условие того, что хотя бы один выход блока y_i $(i \in 1:n)$ используется другим блоком. Логическая переменная y_n представляет «внешнюю среду», ее включение в формулу обеспечивает получение требуемого преобразования входных потоков (сырья) $ex(y_n)$ в потоки целевых продуктов $in(y_n)$. Для рассматриваемого примера на рис.2, *в* алгоритм ssf2012-UUP формирует логическое выражение $f(y_1, \ldots, y_n)$ в виде

$f(y1, \ldots, y9) = y9\,(-y1 \vee y9)\,(-y2 \vee y9\,y5) \wedge$
$\wedge\,(-y3 \vee (y1 \vee y2)\,y6y9)\,(-y4 \vee (y1 \vee y2) \wedge$
$\wedge\,(y1 \vee y2))\,(-y5 \vee y1 \vee y2)\,(-y6 \vee y3 \vee y4) \wedge$
$\wedge\,(-y7 \vee y4 \vee y5)\,(-y8 \vee y5\,(y4 \vee y5)) \wedge$
$\wedge\,(-y9 \vee y6 \vee y7 \vee y8)\,(-y1 \vee y3 \vee y4 \vee y5) \wedge$
$\wedge\,(-y2 \vee y3 \vee y4 \vee y5)\,(-y3 \vee y6) \wedge$
$\wedge\,(-y4 \vee y6 \vee y7 \vee y8)\,(-y5 \vee y2 \vee y7 \vee y8) \wedge$
$\wedge\,(-y6 \vee y3 \vee y9)\,(-y7 \vee y9)\,(-y8 \vee y9) \wedge$
$\wedge\,(-y9 \vee y1 \vee y2 \vee y3).$

В записи $f(y1, \ldots, y9)$ для обозначения логической операции И (конъюнкция) используется символ *, операции ИЛИ (дизъюнкция) – знак плюс, операции НЕ (отрицание) – знак минус. Функция $f(y1, \ldots, y9)$ представляет всевозможные варианты синтезируемой потоковой схемы – все минимальные варианты и варианты с разной степенью избыточности, включая суперструктуру.

При построении гибких схем обогащения руд в них должен быть заложен оптимальный уровень избыточности, позволяющий оперативно перенастраивать их в соответствии с экономической целесообразностью, например в условиях возрастания потребности в редкоземельных металлах.

С помощью алгоритма ssf2012-UUP для рассматриваемого примера получен перечень из 115 вариантов разной степени избыточности, закодированных в шестнадцатеричной системе счисления:

125, 127, 12D, 12F, 135, 137, 13D, 13F, 165, 167, 16D, 16F, 175, 177, 17D, 17F, 1A5, 1A7, 1AD, 1AF, 1B5, 1B7, 1BD, 1BF, 1E5, 1E7, 1ED, 1EF, 1F5, 1F7, 1FD, 1FF, 129, 12B, 139, 13B, 169, 16B, 179, 17B, 1A9, 1AB, 1B9, 1BB, 1E9, 1EB, 1F9, 1FB, 099, 09B, 09D, 09F, 0B9, 0BB, 0BD, 0BF, 0D9, 0DB, 0DD, 0DF, 0F9, 0FB, 0FD, 0FF, 199, 19B, 19D, 19F, 1D9, 1DB, 1DD, 1DF, 095, 097, 0B5, 0B7, 0D5, 0D7, 0F5, 0F7, 195, 197, 1D5, 1D7, 093, 0B3, 0D3, 0F3, 193, 1B3, 1D3, 1F3, 15D, 15F, 133, 173, 15B, 115, 117, 11D, 11F, 155, 157, 113, 11B, 153, 149, 14B, 14D, 14F, 159, 1C9, 1CB, 1CD, 1CF.

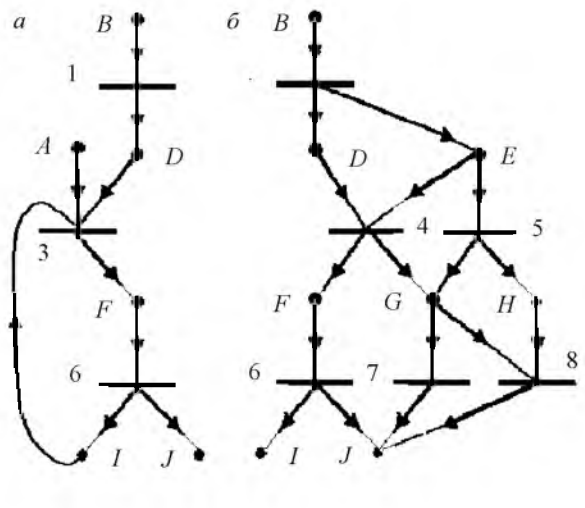


Рис.3. Варианты потоковой схемы, представленной шестнадцатеричным числом 149 (*а*) и числом 13F (*б*)

Для декодирования варианта, представленного шестнадцатеричным числом, необходимо рассмотреть его двоичный эквивалент. Тогда позиции с единичными значениями двоичного числа будут соответствовать порядковым номерам операционных блоков, включенных в вариант, в соответствии со схемой

$$0001_{y1}\ 1_{y2}1_{y3}1_{y4}1_{y5}\ 1_{y6}1_{y7}1_{y8}1_{y9}\,.$$

Например, варианту 149 соответствует двоичное число 0001 0100 1001 и вариант потоковой схемы [*y*1, *y*3, *y*6, *y*9] (рис.3, *а*), варианту 13F – двоичное число 0001 0011 1111 и вариант потоковой схемы [*y*1, *y*4, *y*5, *y*6, *y*7, *y*8, *y*9] (рис.3, *б*).

Авторы [11] говорят о строгом обосновании использования Р-графов (И-ИЛИ-графов) для представления поточной схемы. Однако это представление не является принципиальной схемой, предназначенной для монтажа соответствующего оборудования, поскольку описывает предметную область синтеза на определенном уровне абстракции. Это связано с тем, что вершины из *S* могут интерпретироваться, например, как смесители, распределители или переключатели потоков.

Алгоритмы программы ssf2012 служат только для порождения множества *M* всевозможных вариантов структурных схем на основе правил, представляющих в систематизированном и формализованном виде знания в конкретной предметной области синтеза. Методы решения задачи структурно-параметрического синтеза технологической схемы обогащения руд зависят от вида целевой функции и сложности параметрических моделей для отдельных вариантов схем. Могут быть использованы методы на основе логико-комбинаторного подхода [2, 5, 6], либо генетические алгоритмы, которые доказали свою конкурентоспособность в практических приложениях при решении многих трудных NP-задач, где применение стандартных методов ветвей и границ, динамического или линейного программирования затруднено.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Анкудинов Г.И.* Об одном общем подходе к синтезу структуры алгоритмов, устройств и систем // Кибернетика. 1982. № 1. С.55-68.

2. *Анкудинов Г.И.* Синтез структуры сложных объектов. Л., 1986. 260 с.

3. *Анкудинов И.Г.* Морфологический синтез надежных потоковых схем с учетом совместимости элементов // Надежность. 2006. № 3. С.29-36.

4. *Анкудинов И.Г.* Структурирование пространства поиска для синтеза надежных потоковых схем // Надежность. 2006. № 2. С.28-35.

5. *Анкудинов И.Г.* Автоматизация структурного синтеза и принятия решений в управлении и проектировании. СПб, 2008. 202 с.

6. *Анкудинов Г.И.* Логико-комбинаторный подход к морфологическому синтезу в управлении и проектировании / Г.И.Анкудинов, И.Г.Анкудинов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского политехнического университета. Информатика, телекоммуникации, управление. 2011. № 4. С.46-52.

7. *Анкудинов Г.И.* Комбинаторный синтез комплексных поточных схем добычи и переработки минерального сырья / Г.И.Анкудинов, И.Г.Анкудинов // Нефтепереработка и нефтехимия. 2012. № 10. С.7-11.

8. *Капустян В.М.* Конструктору о конструировании атомной техники: Системно-морфологический подход в конструировании / В.М.Капустян, Ю.А.Махотенко. М., 1981. 190 с.

9. *Морозовский В.Т.* Системы электроснабжения летательных аппаратов / В.Т.Морозовский, И.М.Синдеев, К.Д.Рунов, М., 1973. 420 с.

10. *Brendel M.H., Friedler F., Fan L.T.* Combinatorial foundation for logical formulation in process network synthesis // Computers and Chemical Engineering. 2000. Vol.24. P.1859-1864.

11. *Friedler F., Tarjan K., Huang Y.W., Fan L.T.* Combinatorial Algorithms for Process Synthesis // Computers and Chemical Engineering. 1992. Vol.16. P.313-320.

12. *Friedler F., Tarjan K., Huang Y.W., Fan L.T.* Graph-Theoretic Approach to Process Synthesis // Axioms and Theorems, Chem. Engng Sci. 1992. Vol.47. P.1973-1988.

13. *Grossmann I.E.* Advances in logic-based optimization approaches to process integration and supply chain management, in Chemical Engineering // Trends and Developments / Ed. by M.A.Galan, E. Del Valle. West Sussex: Wiley, 2005. P.299-322.

REFERENCES

1. *Ankoudinov G.I.* General approach to structure synthesis of algorithms, devices, and systems // Kibernetika. 1982. N 1. P.55-68.

2. *Ankudinov G. I.* Synthesis of structure of complex objects. Leningrad, 1986. 260 p.

3. *Ankudinov I.G.* Morphological synthesis of reliable flow diagrams taking into account compatibility of elements // Reliability. 2006. N 3. P.29-36.

4. *Ankudinov I.G.* Structuring search space for synthesis of reliable flow diagrams // Reliability. 2006. N 2. P.28-35.

5. *Ankudinov I.G.* Automation of structural synthesis and decision-making in management and design. Saint Petersburg, 2008. 202 p.

6. *Ankudinov G.I., Ankudinov I.G.* Logical and combinatorial approach to morphological synthesis in management and design // Scientific and technical papers of Saint Petersburg State Politechnical University. Informatics, telecommunications, management. 2011. N 4. P.46-52.

7. *Ankudinov G.I., Ankudinov I.G.* Combinatorial synthesis of complex flowsheets for processing mineral raw materials // Oil processing and petrochemistry. 2012. N 10. P.7-11.

8. *Kapustyan V.M., Makhotenko Yu.A.* To the designer about designing of nuclear equipment: System and morphological approach in designing. Moscow, 1981. 191 p.

9. *Morozovsky V.T., Sindeev I.M. Runov K.D.* Systems of aircraft power supply. Moscow, 1973. 420 p.

10. *Brendel M.H., Friedler F., Fan L.T.* Combinatorial foundation for logical formulation in process network synthesis // Computers and Chemical Engineering. 2000. Vol.24. P.1859-1864.

11. *Friedler F., Tarjan K., Huang Y.W., Fan L.T.* Combinatorial Algorithms for Process Synthesis // Computers and Chemical Engineering. 1992. Vol.16. P.313-320.

12. *Friedler F., Tarjan K., Huang Y.W., Fan L.T.* Graph-Theoretic Approach to Process Synthesis // Axioms and Theorems, Chem. Engng Sci. 1992. Vol.47. P.1973-1988.

13. *Grossmann I.E.* Advances in logic-based optimization approaches to process integration and supply chain management // Chemical Engineering: Trends and Developments / Ed. by M.A.Galan, E. Del Valle. West Sussex: Wiley, 2005. P.299-322.