

На правах рукописи

**Нгуен Ван Чи**

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ  
СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБО-  
ГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ,  
управление и обработка информации  
(региональные народнохозяйственные комплексы)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иркутск – 2011

Работа выполнена на кафедре автоматизированных систем  
ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Петров Александр Васильевич**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Елохин Владислав Романович**

кандидат физико-математических наук,  
доцент **Ступин Виталий Валерьевич**

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Защита состоится 1 ноября 2011 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.070.07 при Байкальском государственном университете экономики и права по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, д. 24, зал заседаний ученого совета БГУЭП.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Байкальского государственного университета экономики и права по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, БГУЭП, корпус 2, аудитория 101.

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.070.07.

Автореферат разослан 28 сентября 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Т.И. Ведерникова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время совершенствование технологических процессов переработки минерального сырья и прогнозирование технико-экономических показателей имеют важное значение для повышения эффективности обогащения руд. При этом необходим правильный выбор технологической схемы проектируемого предприятия, для чего требуется знание достоверных данных о технико-экономических показателях при неполной информации о технологических свойствах сырья и параметрах аппаратов, предназначенных для его переработки. Использование для этих целей физических моделей требует больших финансовых и трудовых затрат. Наиболее эффективным инструментом в этом случае является имитационное моделирование, которое учитывает динамику протекающих процессов, позволяет оценить течение процессов в исследуемой системе и результативность выбранной технологической схемы. Поэтому использование методов имитационного моделирования дает возможность проведения исследований еще в стадии проектирования и выбрать наиболее эффективную схему обогащения. В связи с этим разработка методики, позволяющей смоделировать новые технологические процессы, является весьма актуальной задачей.

**Целью работы** является разработка методик построения и применения имитационных моделей для повышения эффективности обогащения полезных ископаемых, экономической оценки эффективности и прогнозирования развития обогатительного предприятия с учетом динамических свойств процессов, имеющих место в обогатительной технологии.

Достижение указанной цели связано с решением целого комплекса задач, включающего:

- анализ проблем проектирования и моделирования обогатительных предприятий и существующих методов их решения;
- разработку методики синтеза имитационных моделей проектируемых и действующих технологических процессов обогащения полезных ископаемых, максимально использующую имеющуюся информацию об объекте моделирования;
- создание программного продукта, обеспечивающего имитационное моделирование обогатительного процесса с возможностью экономической оценки его результатов.

**Методы исследования.** В работе использовались методики и методы системного анализа (имитационное моделирование), теории матриц, теории вероятностей и математической статистики, методы генерирования векторов случайных чисел.

**Научную новизну работы, которая выносится на защиту составляют:**

- 1) эвристический метод поиска дополнительных уравнений систем нелинейных уравнений при определении разделительных коэффициентов качественно-количественных схем;
- 2) методика имитационного моделирования, использующая различные методы имитации разделительных операций технологических процессов обога-

щения на стадии проектирования и на стадии эксплуатации;

3) методика применения экономической оценки эффективности в имитационной модели технологических процессов обогащения.

**Практическая значимость.** Предлагаемые методы, методики, разработанное алгоритмическое и программное обеспечение обеспечивают работников обогатительных предприятий надежным инструментом для повышения качества проектирования и эксплуатации горно-обогатительного предприятия на разных стадиях с возможностью оценки экономической эффективности предполагаемых реконструкций технологических процессов. Кроме того, эти методы, методики и реализующие их алгоритмы и программы могут использоваться при обучении персонала управлению технологическими процессами и в учебных целях как в процессе подготовки специалистов-обогатителей и системотехников, так и при их переподготовке.

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены и обсуждены на XV Байкальской всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении», г. Иркутск, 2010 г.; на III и IV Всероссийских научно-практических конференциях «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов», г. Томск, 2010-2011 гг.; на XII международной конференции «Computer science and information technologies», г. Москва и г. Санкт Петербург, 2010 г.; на IV Всероссийской конференции «Винеровские чтения», г. Иркутск, 2011 г.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 07 печатных работ в виде статей и докладов, в том числе 02 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК: «Графический редактор технологических схем обогащения полезных ископаемых» // Вестник ИрГТУ. – 2010. – №4(44). – С. 12-15; «Экономическая модель технологических процессов обогащения полезных ископаемых» // Вестник ИрГТУ. – 2010. – №5(45). – С. 16-21, двух Свидетельствах Роспатента о регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 111 наименований и 2 приложений. Основной текст работы изложен на 144 страницах, содержит 03 таблицы и 74 рисунка.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** определена роль системных методов исследований в современной науке. Исследованы основные часто используемые в литературе понятия «системный подход», «теория систем», «системный анализ» и «системотехника» и их связи. Проанализированы стадии и преимущества системного анализа, который является наиболее приемлемым эффективным инструментом исследования сложных технических систем, в том числе и технологических процессов обогащения полезных ископаемых.

**В первой главе** обоснована актуальность проблемы проектирования и моделирования технологий обогащения полезных ископаемых, которой обусловлена актуальность темы диссертации. Рассмотрены основные понятия сложных систем, моделирования и моделей. Приведён обзор существующих методов

моделирования обогатительных процессов и большое внимание уделено имитационному моделированию. На этой основе сформулированы цель и основные задачи исследования.

**Во второй главе** рассмотрены этапы проектирования обогатительных предприятий и существующие технологии обогащения полезных ископаемых.

Рассмотрены две стадии обогащения: разьединение минералов (рудоподготовку) и разделение минералов (сепарацию). Также рассмотрены основные и вспомогательные процессы разделения минералов.

На каждой стадии обогащения используются разные обогатительные аппараты. Рассмотрены в данной главе аппараты для подготовки полезных ископаемых к обогащению и аппараты для переработки и обогащения полезных ископаемых. Подробно рассмотрены аппараты для грохочения, классификация, дробления и измельчения, относящихся к рудоподготовке, и аппараты для гравитационного, флотационного, магнитного, электрического сепарации, относящихся к сепарации минералов.

Рассмотрены разделительные свойства минеральных частиц, на различиях в которых основаны методы разделения минеральных частиц. Приведены технические показатели обогатительных технологий такие, как массы продуктов  $m_i$ , производительности  $Q_i$ , содержание ценного компонента в продукте  $\beta_i$ , выход продукта  $\gamma_i$ , извлечение ценного компонента  $\varepsilon_i$ .

Для определения экономической эффективности в условиях горно-обогатительных комбинатов рассмотрены методы расчетов экономических показателей, связанных с изменениями объема производства извлечения металла, качества исходного сырья, поступающего в переработку, комплексности использования сырья и отходов производства, расходных коэффициентов и цен на материалы, топливо, электроэнергию и др.

Рассмотрены качественно-количественные схемы, представляющие собой системное описание технологий обогащения.

**В третьей главе** рассмотрены математические модели технологических процессов обогащения полезных ископаемых и описан алгоритм функционирования имитационной модели. Математические модели основаны на двух методах: методе структурных графов (С-графов) и методе сепарационных характеристик. Отмечено, что первый метод предназначен для использования на этапе проектирования обогатительного предприятия, так как имеющейся на этом этапе информации достаточно для построения модели разделительной операции, а второй метод – сепарационных характеристик – является более точным и позволяет учесть не только свойства сырья, но и структуру технологической схемы, параметры оборудования и управляющие параметры. Но для его использования требуется наличие детальной информации, на основе которой находятся параметры сепарационных функций. Поэтому метод сепарационных характеристик может быть применен только в условиях действующего предприятия.

Подробно описан метод С-графов и отмечено, что качественно-количественная схема может быть представлена в форме С-графа. Это позволяет использовать метод С-графов с целью применения его для синтеза динамических соотношений, связывающих параметры и процессы моделируемого объ-

екта и служащих основой любой имитационной модели, в том числе и для технологических процессов обогащения полезных ископаемых. Методом С-графов качественно-количественная схема преобразуется в структурный граф и преобразованный структурный граф, на основе которого сформированы матрица структуры  $A$ , матрица операторов  $B$  и матрица  $H=A \cdot B$ , предназначенные для дальнейшего моделирования.

На этапе проектирования обогатительного предприятия в условиях недостатка и низкого качества исходной информации об оборудовании, сырье и управлении имитационная модель должна обеспечивать исследование технологических процессов обогащения при постоянном изменении входной и выходной информации. Автоматизация построения имитационной модели приводит к необходимости поиска решения системы нелинейных уравнений определения разделительных коэффициентов качественно-количественных схем в символьном виде. Методика построения этих систем организуется несоответствием числа неизвестных и числа уравнений. Методы поиска дополнительных уравнений, предложенные в работах А. В. Петрова и Ю. Н. Алпатова, оказываются сложными и громоздкими при решении в символьном виде. Они основаны на преобразовании операций, на определении ранга, определителей матрицы  $H$  и её частных определителей. С целью облегчения процесса поиска дополнительных уравнений и решения систем нелинейных уравнений определения разделительных коэффициентов качественно-количественных схем именно в символьном виде разработаны эвристический метод поиска дополнительных уравнений и алгоритм автоматизированного решения систем нелинейных уравнений определения разделительных коэффициентов качественно-количественных схем в символьном виде.

Рассмотрены два примера нахождения основной операции канонических схем с обратной связью по методу, предложенному в работах А. В. Петрова и Ю. Н. Алпатова.

В первом примере рассмотрен фрагмент технологической схемы с обратной связью, представленный на рис. 1.

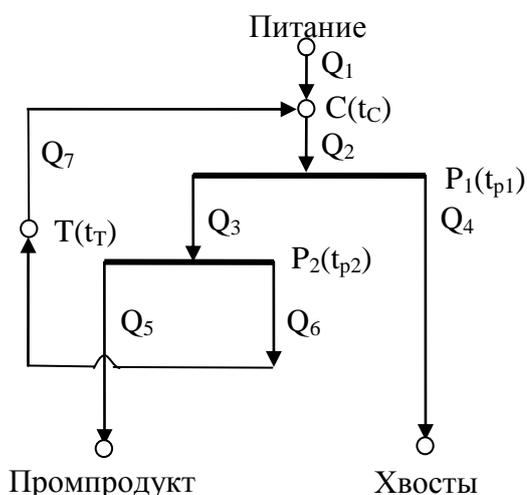


Рис. 1. Типичный фрагмент технологической схемы с обратной связью

Такой фрагмент имеет место во многих схемах. Здесь  $C$  – операция смешивания,  $P_1, P_2$  – разделительные операции,  $T$  – транспортная операция,  $Q_j$  – потоки ( $j=1,2,\dots,7$ ). Причём  $P_1$  – основная операция фрагмента.

С помощью метода  $C$ -графов, данный фрагмент может быть представлен в виде структурного графа и преобразованного структурного графа. На основе преобразованного структурного графа технологической схемы сформированы матрица структуры  $A$  и матрица операторов  $B$ , с которых сформирована матрица  $H=A \cdot B$ . Методом преобразования операций получена система нелинейных уравнений определения разделительных коэффициентов качественно-количественных схем, которая не требует доопределения. Решив её, получим следующие результаты:

$$\begin{cases} P_1 = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_4}, \\ P_2 = \frac{Q_4}{Q_1}, \\ Q_2 = Q_1 + Q_4, \\ Q_{1,2} = Q_1, \\ Q_{1,9} = Q_1 - Q_4, \\ Q_{2,2} = Q_4. \end{cases} \quad (1)$$

Отмечено, что технологические схемы такого типа, имеющие более сложную структуру можно привести к виду схемы, представленной на рис. 1.

Во втором примере рассмотрен укрупнённый фрагмент технологической схемы с обратной связью (рис. 2).

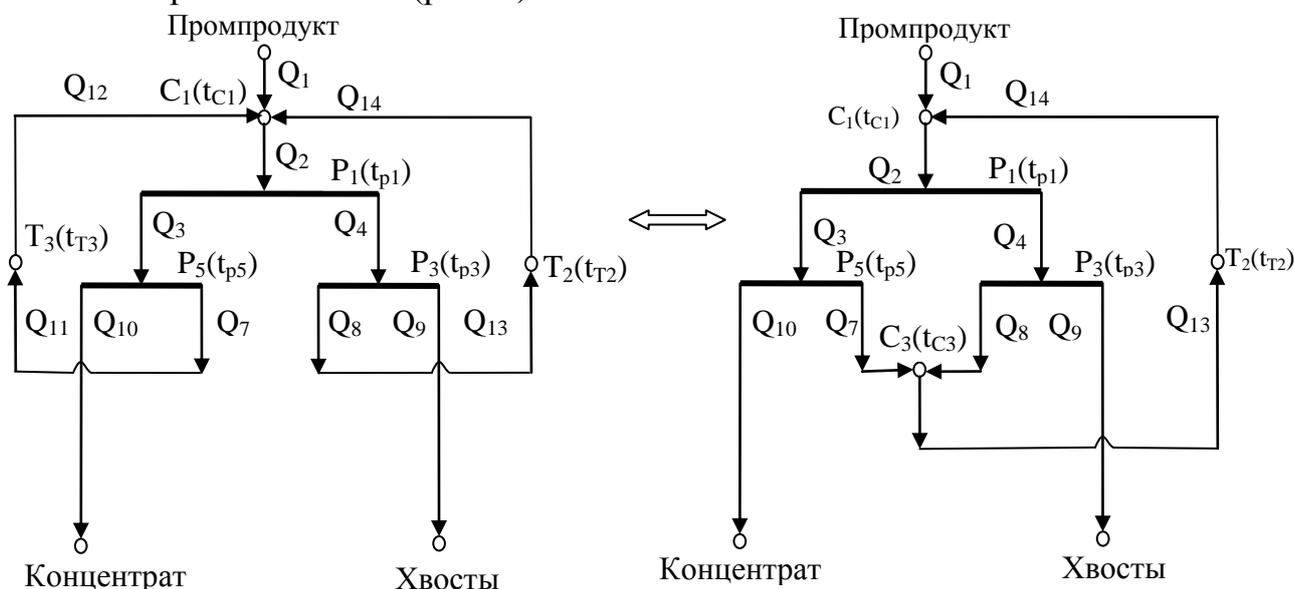


Рис. 2. Подобные укрупнённые фрагменты технологической схемы с обратной связью

Строим структурный граф и преобразованный структурный граф укрупнённого фрагмента схемы методом  $C$ -графов, на основе которого формируются матрицы  $A, B$  и  $H=A \cdot B$ . С помощью техники блочных матриц, понизим размерность матрицы  $H$  и вычислим три частных определителя матрицы  $H$  одного



На основе матрицы  $H$  и дополнительного уравнения (3) или (4), сформируем систему нелинейных уравнений для определения разделительных коэффициентов качественно-количественных схем. С целью машинного синтеза имитационной модели находится её решение в символьном виде. Решение, представляемое в символьном виде, прямо встраивается в имитируемую программу.

Алгоритм решения систем нелинейных уравнений для определения разделительных коэффициентов качественно-количественных схем в символьном виде заключается в следующем:

- формируем векторы известных переменных (входных, хвостов, концентратов);
- формируем основную операцию по формуле (3) или (4);
- преобразуем матрицу  $H=A \cdot B$  в ступенчатую для последовательного исключения неизвестных переменных методом Гаусса;
- реализуем процедуру поиска решения каждого уравнения с первой строки матрицы  $H$  до последней и наоборот, с последней до первой (условия выхода этого цикла: найдены все неизвестные переменные или число повторов больше количества неизвестных);
- в случае, когда число повторов больше числа переменных, но не все неизвестные найдены, автоматическое решение такой системы нелинейных уравнений невозможно и предлагается решить её вручную.

Процедура поиска решения каждого уравнения состоит в следующем:

- для каждого столбца матрицы  $H$ , найдём строку, содержащую какой-либо оператор (1, -1, C, T, M, E, F, G);
- определим число неизвестных переменных ( $cal$ ) для этой строки (т.е. число неизвестных, входящих в это уравнение);
- если  $cal=1$ , т.е. уравнение содержит только одну неизвестную переменную, то найдём решение этого уравнения, иначе пропустим;
- повторим процедуру до последней строки матрицы  $H$ .

Приведён пример решения систем нелинейных уравнений в символьном виде по сформулированному алгоритму для технологической схемы, представленной на рис. 1.

На рис. 3 представлен структурный граф заданной технологической схемы, а на рис. 4 матрица  $H=A \cdot B$ , где  $m_i=Q_i$ .

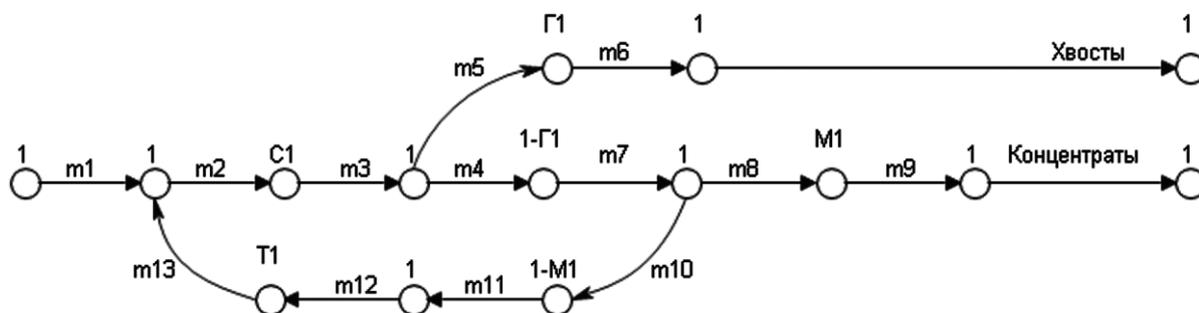


Рис. 3. Структурный граф рассматриваемой технологической схемы

m1	m2	m4	reject	m7	product	m10
1	-1	0	0	0	0	t1
0	c1	-1	0	0	0	0
0	0	g1o	-1	0	0	0
0	0	0	0	1m1p	0	-1
0	0	0	0	m1p	-1	0
0	0	1g1o	0	-1	0	0

Рис. 4. Матрица  $H=A \cdot B$

Отмечено, что элементы матрицы  $H$  представляют собой символьные записи, к которым применить формальные математические обоснования нельзя.

На основе преобразованной матрицы  $H$  эвристическим методом поиска дополнительных уравнений систем нелинейных уравнений для определения разделительных коэффициентов качественно-количественных схем в символьном виде находятся все неизвестные операторы и массы минеральных частиц. Алгоритм легко адаптируется к любой схеме.

На рис. 5 представлены результаты решения системы нелинейных уравнений, полученные посредством предложеного алгоритма.

Переменная	Значение в символьном виде
m1	m1
g1o	$m1/(m1+rej)$
1g1o	$rej/(m1+rej)$
reject	rej
product	pro
m4	$-(-rej)/(m1/(m1+rej))$
m7	$-(-rej)/(m1/(m1+rej))*rej/(m1+rej)$
1m1p	$1+(-(-1-rej))/(-(-rej)/(m1/(m1+rej))*rej/(m1+rej))$
m1p	$-(-(-1-rej))/(-(-rej)/(m1/(m1+rej))*rej/(m1+rej))$
m10	$-(-rej)/(m1/(m1+rej))*rej/(m1+rej)*1+(-(-1-rej))/(-(-rej)/(m1/(m1+rej))*rej/(m1+rej))$
m2	$m1+(-(-rej)/(m1/(m1+rej))*rej/(m1+rej)*1+(-(-1-rej))/(-(-rej)/(m1/(m1+rej))*rej/(m1+rej)))$

Рис. 5. Результаты решения системы в символьном виде

Рассмотрен второй метод имитации разделительных операций – метод сепарационных характеристик, который представляет собой эффективный метод имитации операций разделения действующей обогатительной фабрики. Приведены определения, пути поиска сепарационных характеристик обогатительных аппаратов или участка схем. Также рассмотрены подробно сепарационные характеристики четырёх основных аппаратов разделения минеральных частиц: гравитационного, магнитного, электрического и флотационного сепаратора, которые используются как математическая основа моделирования разделительных операций. Рассмотрены методы вычисления результирующих сепарационных характеристик  $\epsilon_{рез}(\xi)$ , предназначенных для вычисления технических и экономических показателей обогатительных предприятий.

Подробно описан алгоритм функционирования имитационной модели. Метод сепарационных характеристик вместе с методом вычисления результирующих сепарационных характеристик схем позволяет рассчитать прогнозные технологические и экономические показатели процессов обогащения. Подробно

описан алгоритм вычисления этих показателей для каждого типа сырья, соответствующего типу технологической схемы.

В имитационной модели все входные воздействия рассматриваются как случайные величины. С целью генерирования вектора случайных величин, представляющих собой физические свойства минеральных частиц  $\xi(\rho, \chi, q, k)$  и входной массы минеральных частиц  $m_1(t)$  применены одномерное и многомерное нормальные (гауссовские) законы распределения. Для вычисления одномерных определенных интегралов применен метод Симпсона, а для многомерных – метод приближённого вычисления определённых интегралов.

**В четвёртой главе** представлено описание программного комплекса, реализующего вышеизложенные методы и методики исследования технологических схем, автоматизированного синтеза имитационных моделей, поиска дополнительных уравнений, автоматизированного решения систем нелинейных уравнений определения разделительных коэффициентов качественно-количественных схем в символьном виде и имитационного моделирования технологических схем обогащения. Приведены преимущества среды разработки приложений Delphi, которые обусловили её выбор для реализации разработанной имитационной модели. Подробно описан графический редактор, предназначенный для проектирования технологических схем с возможностью задания технических параметров, и описаны основные процедуры и функции модулей технической и экономической моделей. Проведено исследование технологической схемы Онотского месторождения и фрагмента технологической схемы Коршуновского ГОКа. Результаты реализации модели подтвердили правильность и полезность разработанного программного комплекса.

На рис. 6-9 представлена часть выводимой информации при реализации разработанной имитационной модели технологической схемы Онотского месторождения.

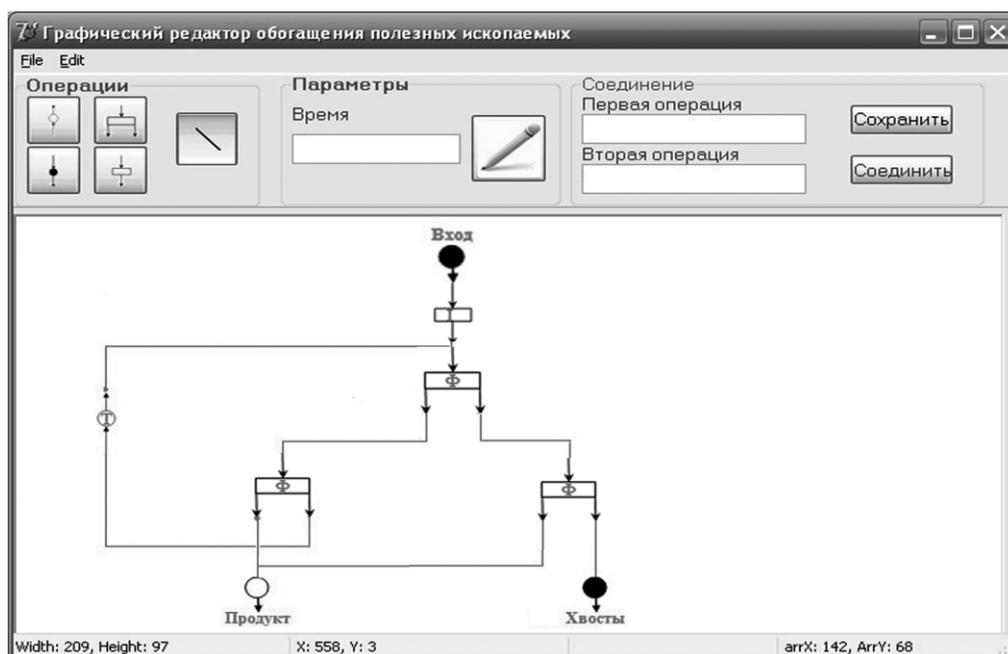


Рис. 6. Технологическая схема обогащения талька Онотского месторождения, введенная с помощью графического редактора

t	m1	rej	F1O	F2K	F3P	m2	m5	m9	pro	m14
1	5,200	1,352	0,794	0,351	0,611	10,089	2,082	8,007	3,848	4,889
2	4,990	1,347	0,787	0,344	0,614	9,659	2,053	7,605	3,642	4,669
3	5,347	3,850	0,581	0,062	0,782	9,809	4,106	5,703	1,497	4,463
4	5,093	0,560	0,901	0,442	0,552	10,128	1,004	9,125	4,533	5,035
5	5,474	3,394	0,617	0,051	0,671	9,342	3,575	5,767	2,080	3,868
6	4,834	1,015	0,826	0,383	0,593	9,475	1,644	7,831	3,819	4,641
7	5,277	1,794	0,746	0,295	0,635	10,032	2,545	7,487	3,483	4,755
8	5,152	0,876	0,855	0,407	0,577	10,167	1,477	8,690	4,276	5,015
9	5,476	4,928	0,526	0,318	0,782	15,259	7,228	8,031	0,548	9,783
10	5,004	2,552	0,662	0,158	0,668	8,970	3,030	5,941	2,452	3,967
11	5,203	3,278	0,613	0,040	0,670	8,835	3,415	5,420	1,925	3,632
12	5,118	1,280	0,800	0,357	0,607	9,952	1,990	7,962	3,839	4,834
13	5,310	4,036	0,568	0,113	0,873	10,536	4,550	5,986	1,274	5,225
14	5,150	0,721	0,877	0,425	0,565	10,205	1,253	8,952	4,429	5,055
15	5,168	1,085	0,826	0,383	0,593	10,130	1,758	8,372	4,083	4,962
16	5,260	0,631	0,893	0,436	0,556	10,449	1,119	9,329	4,629	5,189
17	5,622	2,193	0,719	0,258	0,648	10,529	2,954	7,575	3,429	4,907
18	5,531	0,608	0,901	0,442	0,552	10,999	1,090	9,909	4,923	5,468
19	5,456	1,910	0,741	0,288	0,638	10,344	2,682	7,662	3,547	4,887
20	5,177	3,831	0,575	0,087	0,827	9,869	4,197	5,672	1,346	4,692
21	5,319	1,915	0,735	0,280	0,640	10,053	2,661	7,392	3,404	4,735
22	5,446	4,411	0,552	0,181	0,991	12,031	5,384	6,647	1,035	6,585

Рис. 7. Имитационная модель по методу С-графов

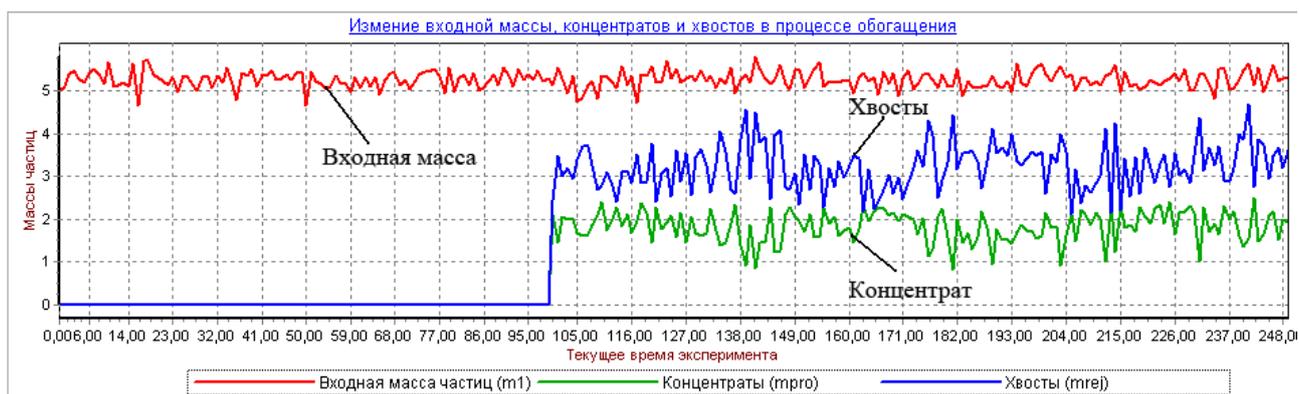


Рис. 8. Изменение входной массы, концентрата и хвостов в процессе обогащения

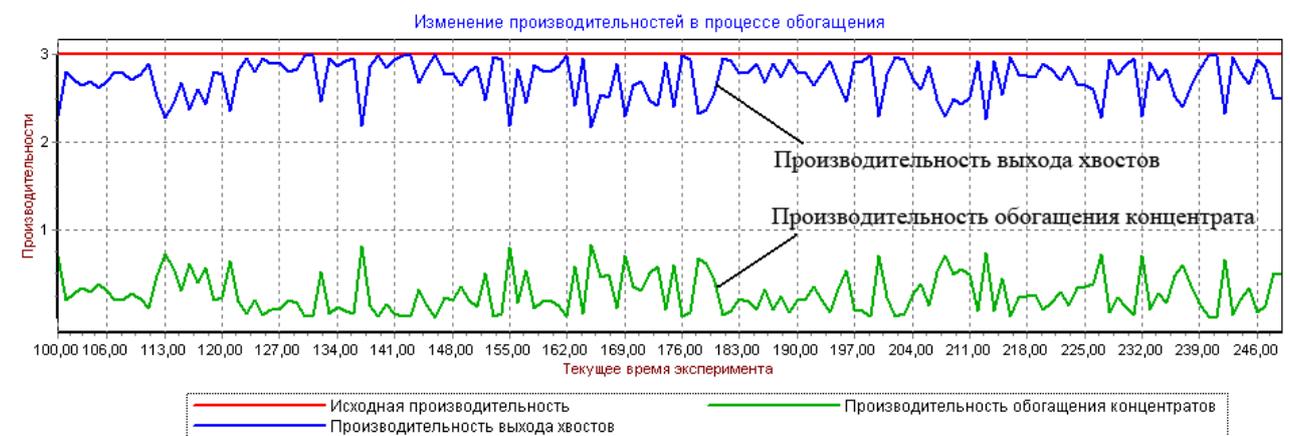


Рис. 9. Изменение производительности в процессе обогащения

На рисунках 8-10 по оси абсцисс отложено текущее время имитационного эксперимента. Из рисунков 8 и 9 видно, что объём полученных концентратов  $pro(t)$  прямо пропорционален входной массе минеральных частиц  $m_1(t)$  и соот-

ответственно производительность по концентратам прямо пропорциональна объёму полученных концентратов. По заданным исходным параметрам сепарационных характеристик объём полученных концентратов меньше объёма хвостов, так как коэффициенты разделения на концентраты  $\epsilon_k$  меньше чем на хвосты  $1 - \epsilon_k$ . Производительность по концентратам при этом меньше чем по хвостам соответственно. Кроме того, время до получения концентратов тоже зависит от заданных параметров длительности выполнения операций. В рассматриваемой технологической схеме одна пересортичная и одна контрольная флотационная операция с одинаковой длительностью, поэтому затрагиваемые времена на получение концентратов и на получение хвостов одинаковы (100 врем. единиц).

На рис. 10 представлена часть выводимой информации при реализации экономической модели. Отметим, что начальное время на этих рисунках, как и на рис. 9, не «0», а «100», так как мы оцениваем экономическую эффективность процессов обогащения только с момента получения концентратов, т.е.  $t=100$  (рис. 8)

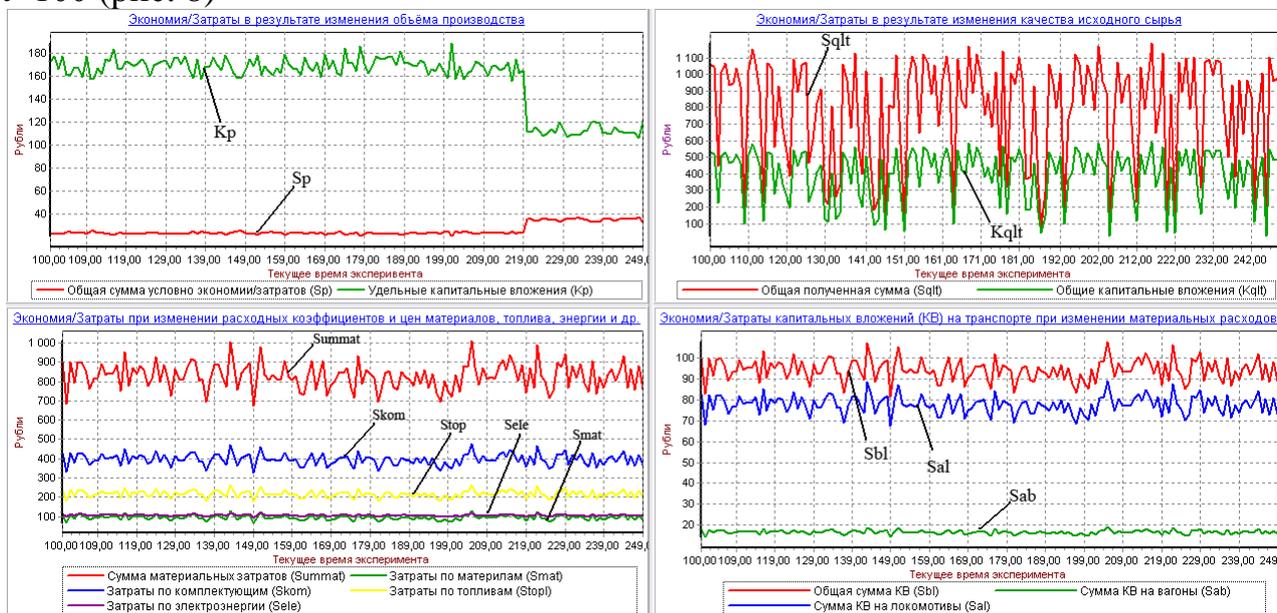


Рис. 10. Результаты вычисления отдельных экономических показателей

В результате осуществления организационно-технических мероприятий, не требующих капитальных вложений, например, за счет лучшего использования оборудования, ликвидации простоев, сокращения продолжительности ремонта, повышения уровня организации производства и др., или требующих капитальных вложений, например, внедрения новых и совершенствования существующих схем технологического процесса, механизации и автоматизации комплекса рабочих процессов, модернизации оборудования и др. увеличивается объем выпуска продукции, снижается себестоимость, изменяются удельные капитальные вложения на данном производстве. Тогда себестоимость единицы продукции и удельные капитальные вложения уменьшаются и наоборот. Поэтому относительное сокращение общей суммы капитальных вложений и общая сумма экономии прямо пропорциональны объёму выпуска продукции (концентратов).

Отмечено, что содержание металлов в сырье оказывает значительное влияние на уровень себестоимости продукции обогатительной фабрики: чем выше содержание металла в сырье, тем больше выход продукции из единицы переработанного сырья и тем ниже затраты на единицу продукции. Поэтому при повышении содержания металла в сырье повышается извлечение металла при обогащении руд без дополнительных затрат, снижается себестоимость единицы продукции и наоборот. При этом сокращённые капитальные вложения и общая сумма экономии прямо пропорциональны уровню содержания металлов в сырье и извлечения металла в продукцию соответственно.

В результате осуществления новых технических решений происходит изменение расходных коэффициентов на сырьё, материалы, топливо и электроэнергию и др. При уменьшении материальных затрат увеличивается себестоимость единицы продукции, уменьшаются удельные капитальные вложения и соответственно сумма экономии обратно пропорциональна сумме материальных затрат. Сокращение норм расхода сырья, материалов, комплектующего, электроэнергии, топлива и др. вызывает уменьшение грузооборота и сокращение капитальных вложений на подвижной состав (вагоны и локомотивы). Общая сумма капитальных вложений на транспорт прямо пропорциональна уровню уменьшения материальных затрат.

Следует отметить, что после проведения экспериментов полученные числовые ряды должны быть подвергнуты статистической или иной аналитической обработке специалистами, применяющими программный комплекс.

Таким образом, с помощью разработанного алгоритмического обеспечения и созданного программного продукта проимитирована работа технологической схемы Онотского месторождения и фрагмента технологической схемы Коршуновского ГОКа. Получены массы минеральных частиц, технические и экономические показатели, которые рассчитаны по времени и визуально представлены в виде таблиц и экспортированы в MS Excel для отчётов, что подтверждает работоспособность программного продукта.

**В заключении** отмечено значение системного анализа и имитационного моделирования при решении проблем проектирования и эксплуатации обогатительных предприятий, приведены основные полученные результаты диссертационной работы, теоретическая и практическая значимость работы.

## **ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПО РАБОТЕ**

1) Разработана методика синтеза имитационных моделей проектируемых и действующих технологических процессов обогащения полезных ископаемых, максимально использующая имеющуюся информацию об объекте моделирования. Методика включает два метода, обеспечивающих построение модели разделительной операции на разных стадиях – метод С-графов на стадии проектирования и метод сепарационных характеристик на стадии эксплуатации.

2) Предложен эвристический метод поиска дополнительных уравнений систем нелинейных уравнений для определения разделительных коэффициен-

тов качественно-количественных схем с целью последующего расчёта и моделирования обогатительных процессов.

3) Предложен алгоритм автоматизированного решения систем нелинейных уравнений для определения разделительных коэффициентов качественно-количественных схем в символьном виде для дальнейшего исследования в имитационной модели. Метод С-графов вместе с эвристическим методом поиска дополнительных уравнений и разработанным алгоритмом решения систем нелинейных уравнений для определения разделительных коэффициентов качественно-количественных схем в символьном виде позволяет найти неизвестные коэффициенты промежуточных операторов и масс минеральных частиц в символьном виде, представляющие собой функции от входной и выходной информации, для дальнейших численных расчётов.

4) Разработана методика применения многомерных результирующих сепарационных характеристик технологических схем для прогнозирования технических и экономических показателей функционирующих процессов обогащения. Метод сепарационных характеристик вместе с методом вычисления результирующих сепарационных характеристик схем позволяет рассчитать прогнозные технологические и экономические показатели процессов обогащения с учётом не только свойств сырья, но и структуры технологической схемы, детальных параметров оборудования и управляющих параметров, которые введены пользователем.

5) Разработано алгоритмическое обеспечение и создан программный комплекс, включающий в себя три компонента: графический редактор для проектирования технологических схем обогащения полезных ископаемых с возможностью задания пользователем технических параметров, техническую модель и экономическую модель для реализации имитационных моделей технологических процессов обогащения.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Нгуен Ван Чи. Графический редактор технологических схем обогащения полезных ископаемых [Текст] / Нгуен Ван Чи, А.В. Петров // Вестник ИрГТУ. – 2010. – №4 (44). – С. 12-15 (авторский вклад 0,15/0,25 п.л.).

2. Нгуен Ван Чи. Экономическая модель технологических процессов обогащения полезных ископаемых [Текст] / Нгуен Ван Чи, А.В. Петров // Вестник ИрГТУ. – 2010. – №5 (45). – С. 16-21 (авторский вклад 0,25/0,40 п.л.).

### **Свидетельства Роспатента о регистрации программ для ЭВМ**

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2011614858. Техничко-экономическая модель обогатительных предприятий / Нгуен Ван Чи, А.В. Петров // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2011.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2011616786. Графический редактор технологических схем обогащения полезных ископаемых / Нгуен Ван Чи, А.В. Петров // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2011.

**В других изданиях:**

5. Нгуен Ван Чи. Техничко-экономическое моделирование технологических процессов обогащения полезных ископаемых [Текст] / Нгуен Ван Чи, А.В. Петров // Информационные и математические технологии в науке и управлении: Труды XV Байкальской Всероссийской конференции. Часть I. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2010. – С. 213-216 (авторский вклад 0,15/0,25 п.л.).

6. Нгуен Ван Чи. Имитационное моделирование технологических процессов обогащения полезных ископаемых [Текст] / Нгуен Ван Чи, А.В. Петров // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов: Сборник докладов III Всероссийской научно-практической конференции. – Томск: Изд. ТПУ, 2010. – С. 128-132 (авторский вклад 0,15/0,35 п.л.).

7. Nguyen Van Chi. Technical and economic simulation of technological mineral dressing processes [Text] / Nguyen Van Chi, A.V. Petrov // Proceedings of the 12<sup>th</sup> international workshop on Computer Science and Information Technologies. Vol.1. – Moscow-St. Petersburg, 2010. – P. 63-65 (авторский вклад 0,10/0,20 п.л.).

8. Нгуен Ван Чи. Моделирование технико-экономических показателей обогащительных технологий [Текст] / Нгуен Ван Чи, А.В. Петров // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов: Сборник докладов III Всероссийской научно-практической конференции. – Томск: Изд. ТПУ, 2010. – С. 128-132 (авторский вклад 0,15/0,35 п.л.).

9. Нгуен Ван Чи. Динамическое моделирование технологических процессов обогащения полезных ископаемых [Текст] / Нгуен Ван Чи, А.В. Петров // Винеровские чтения: Труды IV Всероссийской конференции. Часть II. – Иркутск: ИрГТУ, 2011. – С. 203-210 (авторский вклад 0,35/0,40 п.л.).