ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ ՀԵՐՄԻՆԵ ՄԻՇԱՅԻ

ՊՂՆՁԱՄՈԼԻԲԴԵՆԱՅԻՆ ՀԱՆՔԱՆՅՈՒԹԵՐԻ ՖԼՈՏԱՑՄԱՆ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱԿԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ԿԱՌԱՎԱՐՄԱՆ ՔՈՄՓՅՈՒԹԵՐԱՅԻՆ ՄՈԴԵԼԻ ՄՇԱԿՈՒՄ ԵՎ ՀԵՏԱՁՈՏՈՒՄ

ՄԵՂՄԱԳԻՐ

Ե.13.02 – «Ավտոմատացման համակարգեր» մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիձանի հայցման ատենախոսության

Երևան 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

ГЕВОРГЯН ЭРМИНЕ МИШАЕВНА

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ФЛОТАЦИИ МЕДНО-МОЛИБДЕНОВЫХ РУД

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.02— "Системы автоматизации"

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի պետական ձարտարագիտական համալսարանում (Պոլիտեխնիկ):

Գիտական ղեկավար՝ տ.գ.դ. Ս.Շ. Բալասանյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տ.գ.դ. Թ.Ա. Նալչաջյան

ֆ.մ.գ.թ. U.Ա. Ավետիսյան

Առաջատար կազմակերպություն` «Երևանի կապի միջոցների

գիտահետազոտական ինստիտուտ» ΦԲԸ

Պաշտպանությունը տեղի կունենա 2017թ. մարտի 17-ին, ժամը 14⁰⁰ –ին, Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում գործող 032 «Կառավարման և ավտոմատացման» մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105, 5–րդ մասնաշենք)։

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ –ի գրադարանում։ Մեղմագիրն առաքված է 2017թ. փետրվարի 15-ին։

032 Մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար,

տ.գ.թ.

Լ.Մ. Բունիաթյան

Тема диссертации утверждена в Государственном инженерном университете Армении (Политехник).

Научный руководитель: д.т.н. С.Ш. Баласанян

Официальные оппоненты: д.т.н. Т.А. Налчаджян

к.ф.м.н. С.А. Аветисян..

Ведущая организация: ЗАО "Ереванский научно-исследовательский институт

средств связи"

Защита диссертации состоится 17-го марта 2017г. в 14^{00} часов на заседании Специализированного совета 032 — "Управления и автоматизации", действующего при Национальном политехническом университете Армении (адрес: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105, корпус 5).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.

Автореферат разослан 15-го февраля 2017г.

Ученый секретарь

Специализированного совета

к.т.н. Л.М. Буниатян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Из—за несовершенства технологических процессов флотации медно-молибденовых руд и низкой адекватности математических моделей, используемых в их автоматизированных системах управления, значительная часть молибдена, меди и других редких металлов (18...22%) остаются в хвостах. Упомянутые модели, как правило, имеющие детерминированный характер, не учитывают влияние случайных факторов, в частности, изменений характеристик исходной и измельченной руды (пульпы) на эффективность процесса флотации. Из—за этого заметно снижается адекватность модели управления, что, в свою очередь, приводит к недопустимому снижению точности управления и эффективности процесса флотации руды.

Из вышесказанного следует, что возможным путем повышения эффективности технологического процесса флотации руды является разработка и практическое применение модели стохастического управления этим процессом, обладающей высокой адекватностью.

В настоящее время переработка руды Зангезурского медно-молибденового комбината (ЗАО "ЗММК") достигла таких объёмов, что даже незначительное увеличение извлечения ценных металлов обеспечит ощутимый прирост прибыли. Поэтому неотложность решения задачи повышения качества управления технологическим процессом флотации медномолибденовых руд более чем очевидна, чем и обусловлена актуальность темы диссертации.

Цель и задачи исследования. Целью диссертации является разработка, исследование и практическое применение компьютерной модели для автоматизированного управления технологическим процессом флотации медно-молибденовых руд с учетом влияния изменений характеристик исходной руды и изменений выходных характеристик технологической системы измельчения руды (ТСИР) вследствие отказов ее оборудования на эффективности флотации.

Исходя из указанной цели, в работе поставлены и решены следующие задачи.

- 1. Формализация задачи стохастического управления технологическим процессом флотации медно-молибденовых руд и разработка ее обобщенной модели.
- Сравнительный анализ методов построения статистических моделей технологических процессов с использованием имитационной модели виртуального объекта.
- 3. Идентификация законов распределения времени работы между соседними отказами и времени восстановления измельчительного оборудования ЗММК на основании статистических данных.
- 4. Разработка имитационной модели процесса изменения работоспособности оборудования ТСИР ЗММК.
- 5. Разработка компьютерной модели процесса функционирования ТСИР.
- 6. Определение важнейших переменных математической модели технологического процесса флотации ЗММК методом экспертного опроса.
- 7. Разработка компьютерной модели формирования выходных интервальных характеристик ТСИР.
- Построение имитационной модели формирования характеристик исходной руды на основании статистических данных.

9. Разработка и исследование компьютерной модели для управления технологическим процессом флотации медно-молибденовых руд ЗММК.

Методы исследования. При решении поставленных задач были использованы: методы системного анализа и исследования операций, теория надежности, методы дискретной математики и прикладной статистики, метод экспертной оценки, метод имитационного моделирования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 1. Обоснованы необходимость и целесообразность рассмотрения задачи оптимального управления процессом флотации руды как задачи стохастического программирования, показана необходимость учета влияния изменений характеристик исходной руды и выходных характеристик ТСИР на эффективность технологического процесса флотации руды при решении этой задачи.
- 2. Разработана обобщенная математическая модель задачи стохастического управления технологическим процессом флотации медно-молибденовых руд, которая, по сравнению с моделью детерминированной задачи, обладает более высокой адекватностью благодаря учету влияния случайных изменений характеристик исходной руды и выходных характеристик ТСИР.
- 3. Предложена имитационная модель виртуального объекта, позволяющая путем проведения компьютерных экспериментов оценить эффективность конкурирующих методов моделирования с точки зрения их возможностей выявления физических и системных закономерностей исследуемых объектов.
- 4. В результате обработки статистических данных о надежности измельчительного оборудования, полученных за трехлетний период эксплуатации ТСИР ЗММК, идентифицированы функции распределения времени работы между отказами и времени восстановления измельчительного оборудования, с использованием которых разработана имитационная модель процесса изменения их работоспособности.
- 5. На основании статистических данных построена имитационная модель формирования характеристик исходной медно-молибденовой руды.
- 6. Разработана трехуровневая иерархическая компьютерная модель процесса функционирования ТСИР, позволяющая учитывать влияние отказов измельчительного оборудования на выходные характеристики системы.
- 7. С применением предложенной обобщенной математической модели разработана компьютерная модель для стохастического управления технологическим процессом флотации медно-молибденовых руд, которая, в отличие от существующих аналогичных детерминированных моделей, учитывает влияние случайных изменений характеристик исходной руды и выходных характеристик ТСИР вследствие отказов ее оборудования на эффективность флотации.

Практическая ценность работы обусловлена возможностью улучшения техникоэкономических показателей технологического процесса флотации медно-молибденовых руд благодаря практическому применению полученных научных и прикладных результатов.

Разработанные в работе компьютерная модель для стохастического управления технологическим процессом флотации медно-молибденовых руд и программный пакет определения важнейших переменных математической модели процесса флотации методом

экспертной оценки включены в состав программного обеспечения автоматизированной системы управления технологическим процессом флотации руды ЗАО "ЗММК" в рамках хоздоговорной научно–исследовательской темы $01-\Gamma/2010$ "Разработка имитационной модели для стохастического управления технологическим процессом флотации молибденовой руды" (2012–2014 гг.) с существенным ожидаемым экономическим эффектом (1,5% от годовой прибыли ЗММК) за счет повышения точности автоматизированного управления технологическим процессом флотации медно-молибденовых руд.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1. Обобщенная математическая модель задачи стохастического управления технологическим процессом флотации медно-молибденовых руд.
- 2. Имитационная модель виртуального объекта.
- 3. Идентифицированные законы распределения времени работы между соседними отказами и времени восстановления измельчительного оборудования ЗММК.
- Имитационная модель процесса изменения работоспособности оборудования ТСИР ЗММК.
- Программный пакет определения важнейших переменных математической модели методом экспертной оценки.
- Компьютерная модель процесса функционирования ТСИР, учитывающая отказы ее оборудования.
- 7. Компьютерная модель формирования выходных интервальных характеристик ТСИР.
- 8. Имитационная модель формирования характеристик исходной руды.
- Компьютерная модель для автоматизированного управления технологическим процессом флотации медно-молибденовых руд ЗММК.

Апробация результатов работы. Основные теоретические и практические результаты работы докладывались на:

- 11-th International Conference "Remote Engineering and Virtual Instrumentation" REV2014 (Порто, Португалия, 2014);
- годичных научных конференциях НПУА (Ереван, Армения, 2012–2016 гг.);
- научных семинарах кафедры "Информационных технологий, информатики и автоматизированных систем" Капанского филиала НПУА (2012–2016 гг.).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 12 научных трудах, список которых представлен в конце автореферата.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 156 наименований и приложений. Основной текст диссертации изложен на 145 страницах, включая 25 рисунков и 7 таблиц. Диссертация написана на армянском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическое значение работы, а также основные положения, выносимые на защиту, изложено краткое содержание работы.

В главе 1 проведен обзор литературы и анализ существующих методов и моделей, используемых для моделирования процесса флотации руды. Рассмотрены проблемы, возникающие при этом, и возможные пути их решения.

Рассмотрены классические (феноменологические и эмпирические) модели процесса флотации и модели, построенные мягкими вычислительными методами (искусственные нейронные сети, нечеткая логика, генетические алгоритмы, метод опорных векторов, деревья решений, комбинированные методы).

Обзор литературы показал, что при построении моделей процессов флотации вышеуказанными методами возникают серьезные трудности, связанные с необходимостью учета воздействия случайных факторов. В результате детального анализа существующих методов построения моделей процесса флотации сделан вывод, что одним из эффективных путей преодоления этих трудностей является сочетание математической модели процесса флотации с имитационной моделью внешней среды, которая без особой трудности может имитировать случайные изменения параметров исходной руды и выходных характеристик ТСИР вследствие отказов ее оборудования. Именно этот метод комбинированного моделирования был выбран и успешно применен в данной диссертационной работе.

Глава 2 посвящена формализации задачи оптимального управления технологическим процессом флотации медно-молибденовых руд, разработке ее обобщенной математической модели и определению состава компьютерной модели управления.

важнейшим Измельчение руды является технологическим процессом рудоподготовки, предшествующим процессу флотации и предопределяющим эффективность. Как показывают практический опыт эксплуатации ТСИР и результаты проведенных на компьютерной модели имитационных экспериментов [2, 4], на качество ее функционирования существенное влияние оказывает надежность измельчительного оборудования: из-за частых отказов мельниц, классификаторов, грунтовых насосов и другого оборудования ухудшаются выходные характеристики ТСИР – производительность (расход твердого), гранулометрические параметры, плотность выходной пульпы. С учетом вышесказанного, а также вследствие нестабильности характеристик исходной руды, как показывает практический опыт эксплуатации обогатительных фабрик, значительно (на 10...15%) снижаются точность управления и эффективность конечного обогащения руды – флотации.

Одним из эффективных путей повышения степени извлечения ценных компонентов является оптимальное управление процессом флотации руды с учетом нестабильности характеристик исходной руды и случайных изменений выходных характеристик ТСИР вследствие отказов ее оборудования.

Задача оптимального управления флотационным процессом традиционно сводится к детерминированной задаче математического, часто нелинейного программирования с поиском экстремума показателя эффективности — функции цели y=f(u,x) по технологическим параметрам и параметрам реагентов $u=(u_1,u_2,...,u_n)$ при заданных характеристиках исходной руды и пульпы $x=(x_1,x_2,...,x_l)$ с ограничениями на нижние и верхние значения искомых параметров. Однако характеристики исходной руды и выходные характеристики ТСИР (характеристики пульпы), определяющие состояние внешней среды, вследствие влияния отказов измельчительного оборудования и воздействия других случайных факторов являются случайными величинами. Учитывая это обстоятельство, задачу оптимального управления процессом флотации необходимо рассматривать как задачу стохастического программирования, ибо при каждом конкретном значении вектора u значения случайной функции цели v =

$$y = f(u, x) \to \underset{u \in U}{ext} . \tag{1}$$

В общем случае эксперимент не определяет полностью состояние внешней среды, поэтому этапы выбора решений могут чередоваться с этапами наблюдений над состоянием внешней среды. Если решение u детерминированное и принимается перед тем, как наблюдается состояние x, то соотношение (1) приобретает определенный вероятностный смысл, поскольку при фиксированном u для одних x_i оно может выполняться, а для других — нет. Исходя из сказанного, задача оптимального управления процессом флотации руды формулируется как задача стохастического программирования u сводится u отысканию экстремума математического ожидания функции цели [2, 11]:

$$M[f(u,\tilde{x})] \to ext$$
. (2)

Выбор показателя эффективности технологического процесса флотации медномолибденовой руды является одним из важнейших этапов в исследовании эффективности функционирования технологической системы обогащения руды. Анализ известных в настоящее время критериев эффективности разделительных процессов позволяет сделать вывод, что наибольшему числу требований, предъявляемых к критериям эффективности обогатительных процессов, удовлетворяет прибыль, получаемая от всего производства концентратов. Прибыль характеризует эффективность процесса флотации с точки зрения конечной цели производства концентратов, учитывает количественные характеристики выпускаемой продукции, производственные затраты, степень извлечения полезных компонентов, качество функционирования измельчительных и других агрегатов. Прибыль учитывает также изменение рыночных условий, поскольку чувствительна к изменению цен на концентраты.

Следует отметить, что наряду с прибылью (y_1) эффективность флотации характеризуется рядом технологических показателей, важнейшими из которых являются среднесменное содержание Mo в молибденовом концентрате (y_2), извлечение молибдена (y_3), среднесменное содержание Cu в медном концентрате (y_4) и извлечение меди (y_5). На эти показатели, которые также зависят от векторов u и x, накладываются определенные

ограничения: их значения не должны быть ниже плановых. Тогда задача оптимального управления процессом флотации, сформулированная как задача стохастического программирования (2), сводится к максимизации математического ожидания функции цели при ограничениях, наложенных на u и технологические показатели y_2 , y_3 , y_4 , y_5 [2, 11]:

$$\begin{cases} M[\widetilde{y}_{1}] = M[f_{1}(u,\widetilde{x})] \to \max_{u \in U}, \\ \widetilde{y}_{2} = f_{2}(u,\widetilde{x}) \geq \beta_{Mo}, \\ \widetilde{y}_{3} = f_{3}(u,\widetilde{x}) \geq \varepsilon_{Mo}, \\ \widetilde{y}_{4} = f_{4}(u,\widetilde{x}) \geq \beta_{Cu}, \\ \widetilde{y}_{5} = f_{5}(u,\widetilde{x}) \geq \varepsilon_{Cu}, \end{cases}$$

$$(3)$$

где β_{Mo} , ε_{Mo} , β_{Cu} , ε_{Cu} – плановые значения показателей y_2 , y_3 , y_4 , y_5 .

Учитывая сложность поставленной задачи, для ее решения целесообразно использовать метод компьютерного моделирования.

Исходя из того, что эффективность флотации зависит от характеристик исходной руды и в большей мере предопределяется качеством функционирования ТСИР, с целью обеспечения высокой адекватности компьютерной модели для управления процессом флотации, базирующейся на предложенной обобщенной математической модели задачи оптимального управления, в данной работе предлагается, кроме имитационной модели формирования характеристик исходной руды, для формирования возможных значений выходных переменных ТСИР использовать ее имитационную модель. Данная модель, которая учитывает влияние отказов измельчительного оборудования на качество функционирования системы, представляет собой композицию двух моделей [2, 4, 11]: вероятностной имитационной модели процесса изменения работоспособности элементов ТСИР, трехуровневой иерархической компьютерной модели процесса функционирования.

Как было отмечено в первой главе, построение моделей технологического процесса руды осуществляется на основании экспериментальных использованием различных статистических методамов. В связи с этим возникает проблема конкурирующих методов. Обычно эффективность методов из способностей моделирования оценивается сравнения прогнозирующих путем построенных с их помощью моделей. Однако этот способ не дает никакого представления моделей соответствия физическим и системным закономерностям моделируемого объекта, что имеет большое значение для моделей управления. Учитывая это обстоятельство, в данной работе предложена имитационная модель виртуального объекта, позволяющая оценить эффективность применения различных методов построения статистических моделей с точки зрения их возможности идентифицировать физические и системные закономерности моделируемого объекта [1, 10, 12].

В качестве виртуального объекта рассматривается стохастическая постулированная модель, используемая в классическом регрессионном анализе [5,6]:

$$\widetilde{y} = G(\widetilde{x}, \beta) + \widetilde{\varepsilon},$$
 (4)

где $\widetilde{x}=(\widetilde{x}_1,\widetilde{x}_2,...,\widetilde{x}_m)$ — вектор входных (независимых) переменных; \widetilde{y} — случайная выходная (зависимая) переменная; $\beta=(\beta_0,\beta_1,\beta_2,...,\beta_m)$ — неизвестный вектор коэффициентов модели; $\widetilde{\varepsilon}$ — случайная величина (случайное возмущение, ошибка, шум), формально учитывающая влияние случайных факторов. Предполагается, что как переменные модели, так и случайное возмущение распределены нормально ($M[\widetilde{\varepsilon}]=0$, $\sigma_{\varepsilon}^2=const$).

Имитационная модель виртуального объекта [1,5,6] функционирует следующим образом. После ввода исходных данных моделирования, а именно: значений параметров μ_j, σ_j , корреляционной матрицы $\|r_{ij}\|, (l,j=\overline{1,m})$ входных переменных моделируемого объекта, значения σ_ε случайного возмущения ε и требуемого количества n имитируемых статистических данных, осуществляется имитация функционирования исследуемого объекта в соответствии с соотношением (4), т.е. моделируются возможные реализации вектора входных переменных $\widetilde{x}=(\widetilde{x}_1,\widetilde{x}_2,...,\widetilde{x}_m)$ методом невырожденного многомерного нормального распределения и случайного возмущения $\widetilde{\varepsilon}$, затем в соответствии с заданной функцией $G(x,\beta)$ формируются возможные значения выходной переменной \widetilde{y} . Далее, на основании статистических данных $\{(\widetilde{x}_{1i},\widetilde{x}_{2i},...,\widetilde{x}_{mi},y_i):i=\overline{1,n}\}$, полученных в результате имитационного моделирования исследуемого виртуального объекта, строятся статистические модели виртуального объекта выбранными методами и выдаются результаты моделирования.

Практическое применение предложенной имитационной модели виртуального объекта иллюстрировано на примере сравнительного анализа метода шаговой регрессии и метода группового учета аргументов [12].

Глава 3 посвящена разработке компьютерной модели процесса функционирования ТСИР с учетом влияния изменений работоспособности ее оборудования на качество функционирования системы.

Компьютерная модель процесса функционирования ТСИР представляет собой композицию двух моделей. Первая из них предназначена для имитации процесса изменения работоспособности элементов системы $Y^0(t)$, вторая — для имитации процесса функционирования системы $Y^k(t)$ под воздействием процесса $Y^0(t)$.

Разработка имитационной модели процесса изменения работоспособности оборудования TCUP

В соответствии с проведенной формализацией процесса изменения работоспособности оборудования ТСИР для его имитации необходимо иметь функции плотностей распределения вероятностей $g_i(\tau_p)$ и $f_i(\tau_s)$ времени работы между соседними отказами (τ_p) и времени восстановления (τ_B) отказавшего оборудования [9].

С целью выявления функций $g_i(\tau_p)$ и $f_i(\tau_e)$ для оборудования ТСИР совместно с сотрудниками ЗММК в течение трех лет был проведен сбор статистической информации об отказах и восстановлениях измельчительного оборудования [8]. Для проверки согласия эмпирических и теоретических распределений использовался критерий χ^2 Пирсона, который особенно мощен при больших выборках $(n \ge 100)$. На основании объединенных выборок были построены гистограммы времени работы между отказами и времени

восстановления для каждой группы оборудования. Исходя из вида каждой гистограммы, было выдвинуто несколько гипотез о законах распределения времени работы между отказами и времени восстановления оборудования. При этом в качестве гипотетических распределений были рассмотрены: экспоненциальное распределение, распределение Вейбулла, логарифмически—нормальное распределение и распределение Релея.

Аналитические выражения функций плотности распределения времени работы между соседними отказами $g_i(\tau_p)$ и времени восстановления $f_i(\tau_e)$ для выделенных групп измельчительного оборудования (элементов ТСИР) имеют следующий вид [8, 9]:

1) Мельница 1-й стадии типа МШР 3200×3800:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot \exp\left(-\hat{\lambda} \cdot \tau_p\right) = 1,925 \cdot 10^{-2} \cdot \exp\left(-1,925 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p\right);$$

$$f_i(\tau_e) = \frac{k \cdot \tau_e^{k-1}}{\hat{\alpha}} \cdot \exp\left(-\frac{\tau_e^k}{\hat{\alpha}}\right) = 0,469 \cdot \tau_e^{-0.3} \cdot \exp\left(-0,67 \cdot \tau_e^{0.7}\right).$$

2) Мельница 2-й стадии типа МШР 3200×3800:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot \exp\left(-\hat{\lambda} \cdot \tau_p\right) = 2,45 \cdot 10^{-2} \cdot \exp\left(-2,45 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p\right);$$

$$f_i(\tau_s) = \frac{k \cdot \tau_s^{k-1}}{\hat{\alpha}} \cdot \exp\left(-\frac{\tau_s^k}{\hat{\alpha}}\right) = 0,4956 \cdot \tau_s^{-0.4} \cdot \exp\left(-0,826 \cdot \tau_s^{0.6}\right).$$

3) Мельница 2-й стадии типа МШР 3200×3100:

$$g_{i}(\tau_{p}) = \hat{\lambda} \cdot \exp\left(-\hat{\lambda} \cdot \tau_{p}\right) = 2,05 \cdot 10^{-2} \cdot \exp\left(-2,05 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_{p}\right);$$

$$f_{i}(\tau_{e}) = \frac{k \cdot \tau_{e}^{k-1}}{\hat{\alpha}} \cdot \exp\left(-\frac{\tau_{e}^{k}}{\hat{\alpha}}\right) = 0,48 \cdot \tau_{e}^{-0,4} \cdot \exp\left(-0,798 \cdot \tau_{e}^{0,6}\right).$$

4) Мельница 1-й стадии типа МШР 3200×3100:

$$\begin{split} g_i\left(\tau_p\right) &= \hat{\lambda} \cdot \exp\left(-\hat{\lambda} \cdot \tau_p\right) = 1,785 \cdot 10^{-2} \cdot \exp\left(-1,785 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p\right); \\ f_i\left(\tau_e\right) &= \frac{k \cdot \tau_e^{k-1}}{\hat{\alpha}} \cdot \exp\left(-\frac{\tau_e^k}{\hat{\alpha}}\right) = 0,492 \cdot \tau_e^{-0.4} \cdot \exp\left(-0.82 \cdot \tau_e^{0.6}\right). \end{split}$$

5) Классификатор типа 2КСН-2,4:

$$\begin{split} g_i \left(\tau_p \right) &= \hat{\lambda} \cdot \exp \left(-\hat{\lambda} \cdot \tau_p \right) = 4,4 \cdot 10^{-3} \cdot \exp \left(-4,4 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p \right); \\ f_i \left(\tau_s \right) &= \frac{\exp \left[-\left(\lg \tau_s - \hat{\mu} \right)^2 / 2\hat{\sigma}^2 \right]}{\hat{\sigma} \sqrt{2\pi} \cdot \tau_s} = \frac{\exp \left[-\left(\lg \tau_s - 0,14 \right)^2 / 0,46 \right]}{0,48 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_s}. \end{split}$$

6) Система смазки мельниц:

$$\begin{split} g_i \left(\tau_p \right) &= \hat{\lambda} \cdot \exp \left(-\hat{\lambda} \cdot \tau_p \right) = 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot \exp \left(-2,6 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p \right); \\ f_i \left(\tau_s \right) &= \frac{\exp \left[-\left(\lg \tau_s - \hat{\mu} \right)^2 / 2\hat{\sigma}^2 \right]}{\hat{\sigma} \sqrt{2\pi} \cdot \tau_s} = \frac{\exp \left[-\left(\lg \tau_s - 0,12 \right)^2 / 0,52 \right]}{0,52 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_s}. \end{split}$$

7) Грунтовой насос типа ГрАК 350/40:

$$g_i\left(\tau_p\right) = \frac{\tau_p}{\hat{\sigma}^2} \cdot \exp\left(-\frac{\tau_p^2}{2\hat{\sigma}^2}\right) = \frac{\tau_p}{4225} \cdot \exp\left(-\frac{\tau_p^2}{8450}\right);$$

$$f_i(\tau_s) = \frac{\exp\left[-\left(\lg \tau_s - \hat{\mu}\right)^2 / 2\hat{\sigma}^2\right]}{\hat{\sigma}\sqrt{2\pi} \cdot \tau_s} = \frac{\exp\left[-\left(\lg \tau_s - 0.292\right)^2 / 0.174\right]}{0.295\sqrt{2\pi} \cdot \tau_s}.$$

8) Грунтовой насос типа ГрАК 1600/50:

$$\begin{split} g_i \left(\tau_p \right) &= \frac{\tau_p}{\hat{\sigma}^2} \cdot \exp \left(-\frac{\tau_p^2}{2\hat{\sigma}^2} \right) = \frac{\tau_p}{3150} \cdot \exp \left(-\frac{\tau_p^2}{6300} \right); \\ f_i \left(\tau_e \right) &= \frac{\exp \left[-\left(\lg \tau_e - \hat{\mu} \right)^2 / 2\hat{\sigma}^2 \right]}{\hat{\sigma} \sqrt{2\pi} \cdot \tau_e} = \frac{\exp \left[-\left(\lg \tau_e - 0.4555 \right)^2 / 0.196 \right]}{0.313\sqrt{2\pi} \cdot \tau_e}. \end{split}$$

9) Мельница самоизмельчения типа ММС 70-23:

$$g_i(\tau_p) = 1.81 \cdot 10^{-2} \exp(-1.81 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p)$$
; $f_i(\tau_g) = 0.44 \cdot \tau_g^{-0.3} \cdot \exp(-0.63 \cdot \tau_g^{0.7})$.

10) Односпиральный классификатор типа КСН– 2,0:

$$g_i(\tau_p) = 5.2 \cdot 10^{-3} \exp(-5.2 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p)$$
; $f_i(\tau_e) = \frac{\exp[-(\lg \tau_B - 0.18)^2 / 0.5]}{0.52\sqrt{2\pi} \cdot \tau_e}$.

Согласно проведенной формализации, имитация процесса изменения работоспособности элементов ТСИР $Y^0(t)$ сводится к имитации случайных процессов возникновения отказов и восстановления отдельных элементов в соответствии с заданными функциями плотностей распределений $g_i(\tau_p)$ и $f_i(\tau_e)$ с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени.

Разработка моделирующего алгоритма осуществлена с использованием принципа особых состояний δz , модульного принципа и регистрового метода [9].

Исходя из сходства логической структуры и последовательности протекания во времени процессов отказов и восстановления элементов, в системе выделены следующие группы элементов:

- 1) мельницы, классификаторы и системы смазки;
- 2) грунтовые насосы, зарезервированные однотипными насосами;
- 3) грунтовые насосы, зарезервированные насосами меньшей производительности-

Выделение указанных групп элементов позволяет построить моделирующий алгоритм и его программную реализацию по модульному принципу, благодаря чему обеспечиваются гибкость, компактность и универсальность имитационной модели.

Разработка компьютерной модели процесса функционировании ТСИР

С целью преодоления большой размерности пространства состояний ТСИР при построении модели процесса ее функционирования в данной работе использованы предложенные С.Ш. Баласаняном [4] проблемно ориентированный метод стратифицированной формализации и обобщенная стратифицированная модель.

Исходя из удобства описания, а также учитывая конструктивные и функциональные особенности ТСИР, целесообразно описывать ее функционирование на трех следующих уровнях: уровне измельчительных агрегатов, уровне измельчительных комплексов и системном уровне.

В соответствии с выбранными уровнями описания выделяются подсистемы соответствующих уровней и на основании содержательного описания ТСИР строится ее формализованная структурная схема в виде трехуровневой иерархической конструкции, вершина которой соответствует системе, рассмотренной как одно целое.

Таким образом, на данном этапе формализации система измельчения представлена в виде трехуровневой структуры из элементов (E_i^0 , $i=\overline{1,86}$; E_i^1 , $i=\overline{1,32}$; E_i^2 , $i=\overline{1,10}$; E_1^3), представляющих собой отдельные подсистемы исходной системы обладающие различными степенями агрегированности.

Уровень измельчительных агрегатов. Учитывая цели моделирования и характер функционирования измельчительного оборудования, подсистемы $E_i^1 (i=\overline{1,32})$ первого уровня (измельчительные агрегаты) рассматриваются как объекты, обладающие двумя возможными состояниями — работоспособным («1») и неработоспособным («0»). Каждая подсистема E_i^1 формализована в виде определенной булевой функции, описывающей условие работоспособности данной подсистемы в зависимости от работоспособности входящих в ее состав элементов E_i^0 , j=1,2,...

 $Ha\ ypoвhe\ usmeльчительных\ комплексов\ TCUP\ представлена\ в\ виде\ совокупности подсистем второго уровня <math>E_i^2$, $i=\overline{1,10}$ (измельчительных комплексов). Каждый измельчительный комплекс в зависимости от работоспособности («1», «0») входящих в его состав или влияющих на его работу измельчительных агрегатов, благодаря способности перестроения структуры системы, может работать в одном из возможных режимов по определенной схеме измельчения. Перестроение структуры системы, которое осуществляется путем использования резервных связей, и выбор режимов работы измельчительных комплексов при изменении работоспособности агрегатов производятся оператором. Процедура принятия решений по выбору структуры и режима работы каждого измельчительного комплекса в зависимости от работоспособности агрегатов формализована в виде дерева принятия решений.

На третьем, системном уровне ТСИР рассматривается как один крупный элемент – смеситель, входом которого является совокупность выходных продуктов измельчительных комплексов, а выходом – объединенная пульпа, поступающая на флотацию.

На данном уровне описания модель ТСИР устанавливает связь между ее выходными характеристиками и характеристиками измельчительных комплексов. Каждый измельчительный комплекс E_i^2 в момент времени t характеризуется производительностью (расходом твердой руды) $x_i^3(t)$, процентом содержания класса <80 мкм $x_{(i+10)}^3(t)$, плотностью пульпы $x_{(i+20)}^3(t)$. Обозначим соответствующие характеристики ТСИР через $y_1^3(t)$, $y_2^3(t)$, $y_3^3(t)$.

В работах [2, 4, 11] показано, что указанные характеристики ТСИР связаны с характеристиками измельчительных комплексов следующими соотношениями:

$$y_1^3(t) = \sum_{i=1}^{10} x_i^3(t)$$
, (5)

$$y_2^3(t) = \left[\sum_{i=1}^{10} x_i^3(t) \cdot x_{(i+10)}^3(t)\right] / \sum_{i=1}^{10} x_i^3(t), \tag{6}$$

$$y_3^3(t) = \left[\sum_{i=1}^{10} \frac{x_i^3(t) \cdot x_{(i+20)}^3(t)}{x_{(i+20)}^3(t) - 1000} \right] / \sum_{i=1}^{10} \frac{x_i^3(t)}{x_{(i+20)}^3(t) - 1000}$$
 (7)

Глава 4 посвящена разработке и исследованию компьютерной модели для стохастического управления технологическим процессом флотации медно-молибденовых руд ЗММК.

Как отмечено в главе 2, компьютерная модель для стохастического управления технологическим процессом флотации медно-молибденовых руд включает математическую модель технологического процесса флотации медно-молибденовых руд:

$$y_{1} = f_{1}(u, x),$$

$$y_{2} = f_{2}(u, x),$$

$$y_{3} = f_{3}(u, x),$$

$$y_{4} = f_{4}(u, x),$$

$$y_{5} = f_{5}(u, x).$$
(8)

В данной главе приведена краткая характеристика технологического процесса флотации медно-молибденовых руд как объекта перспективного управления и рассмотрены возможные методы построения его модели (8).

Определение наилучших переменных модели технологического процесса флотации.

Одной из важнейших задач построения математической модели технологического процесса флотации (8) является определение состава наилучших входных, выходных и управляющих переменных.

С целью определения существенных переменных модели процесса флотации был использован метод экспертной оценки. В результате обработки результатов экспертного опроса с помощью программного пакета "EXPERT", разработанного в программной среде LabVIEW [3], в качестве существенных переменных математической модели технологического процесса флотации медно-молибденовых руд выбраны следующие входные, выходные и управляющие переменные.

Входные переменные

Характеристики выходной пульпы ТСИР: расход (переработка) руды в течение смены (x_1 , в тоннах), среднесменное содержание класса < 80 мкм (x_2 , в %) в готовом продукте, среднесменное значение плотности пульпы (x_3 , в г/л).

Характеристики исходной руды: среднесменные содержания в руде (в %) *Мо* общего (x_4), *Мо* сульфидного (x_5), *Си* общего (x_6) и *Си* окисленного (x_7).

Управляющие переменные

Цикл коллективной флотации: расход извести (u_1 , в г/т), расход Na_2S (u_2 , в г/т), расход бутилового ксантогената (u_3 , в г/т), расход вспенивателя (u_4 , в г/т).

Цикл селективной (Мо) флотации: расход керосина (u_5 , в г/т), расход Na_2S (u_6 , в г/т). *Цикл медной флотации:* расход извести (u_7 , в г/т), бутилового ксантогената (u_8 , в г/т).

Выходные переменные

Среднесменные значения содержания Mo в молибденовом концентрате (y_2 , в %) и извлечения Mo (y_3 , в %), среднесменные значения содержания Cu в медном концентрате (y_4 , в %) и извлечения Cu (y_5 , в %), выходы массы Mo концентрата (y_6 , в тоннах) и массы Cu концентрата (y_7 , в тоннах) в течение смены. На основании среднесменных значений указанных выходных переменных и входного переменного x_1 значение прибыли для каждой смены вычисляется по формуле

$$y_1 = \frac{y_2 \cdot y_6}{100} \cdot C_{Mo} + \frac{y_4 \cdot y_7}{100} \cdot C_{Cu} - x_1 \cdot C_p - L,$$
 (9)

где x_1, y_2, y_4, y_6, y_7 — значения соответствующих переменных; C_{Mo} и C_{Cu} — рыночные цены на 1 т молибден и медь соответственно; C_p — затраты на переработку 1 т руды; L — условно-постоянная часть затрат, приведенная к одной смене.

Построение компьютерной модели формирования выходных интервальных характеристик TCUP. Как было отмечено, качество функционирования TCUP в любой момент времени t характеризуется конкретным набором значений ее выходных характеристик $y^3(t) = (y_1^3t), y_2^3(t), y_3^3(t))$, где $y_1^3(t)$ — производительность системы, t-час; $y_2^3(t)$ — процентное содержание класса t0 мкм в измельченном продукте; t0 — плотность выходной пульпы, t1. С t0 течением времени вследствие отказов и восстановлений измельчительного оборудования происходит перестроение структуры t1 и изменение режимов работы измельчительных агрегатов. В результате измененяются выходные характеристики системы t1, t2, t3, t3, t4. Формально процесс функционирования t4. В вследствие изменения работоспособности элементов.

В качестве интервальных выходных характеристик ТСИР выбраны: сухая масса (в тоннах) переработанной в течение смены руды (q_1), среднесменное процентное содержание класса -80 мкм (q_2) в измельченном продукте, среднесменная плотность (в г/л) пульпы (q_3). Интервальные выходные характеристики системы при условии, что в течение данной смены реализована конкретная фазовая траектория $\left\{ (t_j, y_j^3), j = \overline{1,m} \right\}$, могут быть вычислены по следующим формулам:

$$q_{1} = \sum_{j=1}^{l+1} \tau_{j} \cdot y_{1j}^{3}; \quad q_{2} = \sum_{j=1}^{l+1} \tau_{j} \cdot y_{1j}^{3} \cdot y_{2j}^{3} / q_{1}; \quad q_{3} = \sum_{j=1}^{l+1} \tau_{j} \cdot y_{1j}^{3} \cdot y_{3j}^{3} / q_{1}, \quad (10)$$

где $au_j=t_j-t_{j-1}$ представляет собой случайный интервал времени пребывания системы в j-ом состоянии, характеризующийся конкретным набором ($y_{1j}^3,y_{2j}^3,y_{3j}^3$); m — число изменений состояния системы в течение данной смены; $au_{l+1}=8-\sum\limits_{j=1}^m au_j$ — интервал времени пребывания системы в последнем в данной смене состоянии. Если в течение одной или нескольких смен система остается в одном и том же состоянии $y_j^3=(y_{1j}^3,y_{2j}^3,y_{3j}^3)$, то интервальные характеристики могут быть определены как $q_1=8\cdot y_{1j}^3$; $q_2=y_{2j}^3$; $q_3=y_{3j}^3$.

На основании вышеизложенного построена компьютерная модель [7], которая обеспечивает формирование интервальных выходных характеристик ТСИР при всевозможных реализациях траектории ее функционирования.

Построение имитационной модели формирования характеристик исходной руды.

В соответствии с результатами экспертного опроса важнейшими характеристиками исходной руды являются среднесменные содержания в руде (в %) Mo общего (x_4), Mo сульфидного (x_5), Cu общего (x_6) и Cu окисленного (x_7). С целью построения имитационной модели формирования указанных характеристик на основании статистических данных были идентифицированы функции распределения их вероятностей, определены оценки параметров распределений и коэффициентов корреляции между указанными характеристиками. На основании вышеупомянутых данных построена имитационная модель, которая формирует возможные значения характеристик исходных медно-молибденовых руд методом невырожденного многомерного нормального распределения.

Компьютерная модель для стохастического управления процессом флотации медно-молибденовых руд [2, 11] включает: блок построения модели процесса флотации (8) на основании статистических данных методом пошаговой регрессии или методом группового учета аргументов; блок генерации значений вектора управляющих переменных и; имитационную модель процесса изменения работоспособности элементов ТСИР; компьютерную модель процесса функционирования ТСИР и модель формирования ее выходных интервальных характеристик; имитационную модель формирования характеристик исходной руды [4,7, 9]. Генерация возможных значений вектора и может быть осуществлена как в соответствии с планом экстремального компьютерного эксперимента, методами полного и направленного перебора вариантов, методами случайного поиска, так и с использованием оптимизационных пакетов программ, например, OptQuest, PROMODEL, WITNESS Optimizer и т.п. [2,11].

Укрупненная блок-схема компьютерной модели приведена на рисунке. Программная реализация компьютерной модели осуществлена в программной среде LabVIEW.

Валидация, верификация и проверка работоспособности разработанной компьютерной модели. Одна из наиболее сложных проблем компьютерного моделирования состоит в проверке адекватности (валидации) и достоверности (верификации) модели.

При построении компьютерной модели были использованы известные количественные и качественные методы валидации по отношению как к исходным статистическим данным, компонентам модели, так и к модели в целом, включая проверку статистических гипотез с применением статистических критериев Пирсона, Стьюдента, Крускала-Уоллиса, Шеффе, Фишера, Вилькоксона [2, 8, 11].

Дискретно-событийный характер и модульная структура программы разработанной компьютерной модели позволили легко применить один из наиболее мощных методов верификации – трассировку.

С целью окончательной валидации и верификации разработанной компьютерной модели был проведен имитационный эксперимент с контрольной математической моделью процесса флотации. Результаты эксперимента позволили окончательно убедиться, что разработанная компьютерная модель адекватна реальной системе и пригодна для автоматизированного управления технологическим процессом флотации руды.

Следует отметить, что разработанная компьютерная модель предназначена для перспективного управления технологическим процессом флотации руды. Следовательно,

модель процесса флотации (8) периодически обновляется на основании накопленных статистических данных с помощью пакетов прикладных программ, реализующих методы пошаговой регрессии и группового учета аргументов.

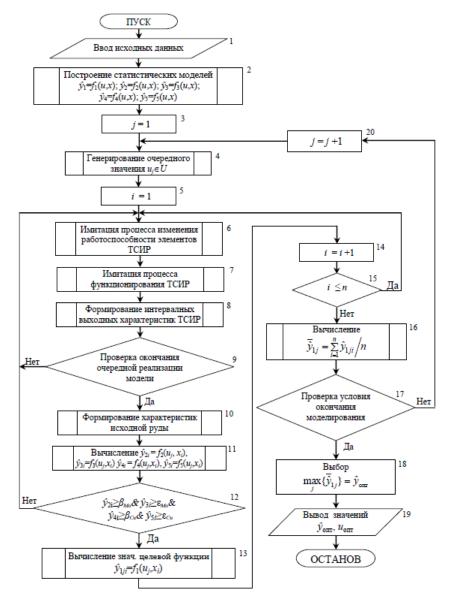


Рис. Укрупненная блок-схема компьютерной модели для стохастического управления процессом флотации руды

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

Диссертационная работа посвящена разработке, исследованию и практическому применению компьютерной модели для автоматизированного управления технологическим процессом флотации медно-молибденовых руд с учетом влияния на эффективность флотации изменений характеристик исходной руды и изменений выходных характеристик технологической системы измельчения руды (ТСИР) вследствие отказов ее оборудования.

В работе получены следующие научные и прикладные результаты:

- 1. Обоснованы необходимость и целесообразность рассмотрения задачи оптимального управления процессом флотации руды как задачи стохастического программирования. Показана необходимость учета влияния изменений выходных характеристик ТСИР и исходной руды на эффективность технологического процесса флотации руды при решении этой задачи [2, 11].
- Разработана обобщенная математическая модель задачи стохастического управления технологическим процессом флотации медно-молибденовых руд, которая благодаря учету влияния случайных изменений выходных характеристик ТСИР и исходной руды, по сравнению с моделью детерминированной задачи, обладает более высокой адекватностью [2, 11].
- Предложена имитационная модель виртуального объекта, позволяющая путем проведения компьютерных экспериментов оценить эффективность конкурирующих методов моделирования с точки зрения их возможностей выявления физических и системных закономерностей моделируемых объектов [1, 5, 6, 10,12].
- 4. На основании статистических данных о надежности оборудования ТСИР ЗММК, собранных за трехлетний период их эксплуатации, идентифицированы функции распределения вероятностей времени работы между отказами и времени восстановления измельчительного оборудования [8]. С использованием этих функций разработана имитационная модель процесса изменения работоспособности оборудования ТСИР, которая благодаря применению модульного принципа и регистрового метода построения моделирующего алгоритма, обладает определенной гибкостью и универсальностью [9].
- 5. Разработана трехуровневая иерархическая компьютерная модель процесса функционирования ТСИР с применением проблемно ориентированного метода стратифицированной формализации и обобщенной стратифицированной модели, благодаря чему удалось преодолеть большую размерность пространства состояний системы [2, 4].
- 6. основании результатов экспертного опроса, проведенного метолом оценки, непосредственной с помощью программного "EXPERT". пакета LabVIEW, определены разработанного среде важнейшие переменные математической модели технологического процесса флотации медно-молибденовых руд ЗММК [3].
- 7. Построена компьютерная модель формирования выходных интервальных характеристик ТСИР, которая позволяет на основании реализаций случайного процесса функционирования ТСИР в восьмичасовом интервале времени формировать значения ее среднесменных выходных характеристик [7].

- 8. С применением предложенной обобщенной математической модели задачи управления, в программной среде LabVIEW разработана компьютерная модель стохастического управления технологическим процессом флотации медномолибденовых руд ЗММК, которая, в отличие от существующих аналогичных моделей, учитывает влияние изменений характеристик исходной руды и выходных характеристик ТСИР вследствие отказов измельчительного оборудования на эффективность флотации. Благодаря этому удалось заметно повысить адекватность модели управления, что позволяет получить более точные решения задачи оптимального управления процессом флотации [2, 11].
- 9. Разработанная компьютерная модель управления технологическим процессом флотации медно-молибденовых руд и программный пакет «EXPERT» определения важнейших переменных математической модели флотации включены в состав обеспечения специального программного автоматизированной управления технологическим процессом флотации ЗММК. Ожидаемый экономический эффект от внедрения компьютерной модели, согласно акту о внедрении, составляет около 1,5 % от годовой прибыли ЗММК, за счет повышения эффективности процесса флотации посредством улучшения качества управления.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- 1. Баласанян С.Ш., Геворгян Э.М. Сравнительный анализ эффективности применения регрессионных методов и метода группового учета аргументов при моделировании технологических процессов // Вестник ГИУА: Сборник научных статей. Ереван, 2011. Том 3, № 1. С. 271–277.
- 2. Баласанян С.Ш., Симонян С.О., Геворгян Э.М. Компьютерная модель для управления ТΠ стохастического флотации руды vчетом надежности измельчительного оборудования // Известия Томского политехнического университета. – Томск, 2013. – Т. 323, № 5. – С. 50–57.
- 3. Баласанян С.Ш., Геворгян Э.М., Агагулян М.А., Григорян С.Р. Оценка важности переменных модели технологической системы флотации медно-молибденовой руды // Вестник ГИУА: Сборник научных статей. Ереван, 2013. Часть 1. С. 219–225.
- 4. Баласанян С.Ш., Геворгян Э.М. Иерархическая трехуровневая компьютерная модель технологической системы измельчения руды // Вестник ГИУА: Сборник научных статей. Ереван, 2014. Часть 1. С. 127–134.
- Balasanyan S.SH., Gevorgyan H.M. The Construction of Statistical Model of a Virtual Object in the LabVIEW Environment // Proceedings of 11th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation REV2014. – Porto, 2014, 26–28 Feb. – P. 291–293.
- 6. Баласанян С.Ш., Геворгян Э.М. Построение статистической модели виртуального объекта в среде LABVIEW // Вестник ГИУА: Сборник научных и методических статей. Ереван, 2015. Часть 1. С. 124–130.
- 7. Геворгян Э.М. Компьютерная модель формирования выходных интервальных характеристик технологической системы измельчения руды // Вестник Инженерной академии Армении. Ереван, 2015. –Т. 12, № 4. С.748–753.

- 8. Геворгян Э.М. Идентификация законов распределения времени работы и времени восстановления измельчительного оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. Томск, 2016. Т. 327, № 3. С. 6–15.
- 9. Баласанян С.Ш., Геворгян Э.М. Имитационная модель процесса изменения работоспособности измельчительного оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. Томск, 2016. –Т. 327, № 2. С. 21–34.
- Баласанян С.Ш., Геворгян Э.М. Применение имитационного моделирования для оценки эффективности методов построения статистических моделей // Вестник НПУА. Серия "Информационные технологии, электроника, радиотехника". 2016. №1. С. 34–46.
- 11. Баласанян С.Ш., Геворгян Э.М. Разработка и исследование компьютерной модели для управления технологическим процессом флотации руды с учетом случайных факторов // Вестник НПУА: Сборник научных статей. Ереван, 2016. Часть 1. С. 127–132.
- 12. Баласанян С.Ш., Геворгян Э.М. Сравнительный анализ методов регрессии и группового учета аргументов при моделировании процессов переработки полезных ископаемых // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. Томск, 2016. Т. 327, № 4. С.23–34.

ህላበቀበቀህມ

Ատենախոսության նպատակը պղնձամոլիբդենային հանքանյութերի ֆլոտացման տեխնոլոգիական գործընթացի ավտոմատացված կառավարման քոմփյութերային մոդելի մշակումը, հետազոտումը և գործնական կիրառումն է՝ հաշվի առնելով ֆլոտացման արդյունավետության վրա սկզբնական հանքանյութի բնութագրերի ու հանքաքարի մանրացման տեխնոլոգիական համակարգի (ՀՄՏՀ) սարքավորումների խափանումների հետևանքով նրա ելքային բնութագրերի փոփոխության ազդեցությունը։

- 1. Հիմնավորվել են պղնձամոլիբդենային հանքանյութերի ֆլոտացման տեխնոլոգիական գործընթացի օպտիմալ կառավարման խնդիրը որպես հավանականային ծրագրավորման խնդիր դիտարկելու անհրաժեշտությունը և նպատակահարմարությունը, ցույց է տրված այդ խնդրի լուծման դեպքում ֆլոտացման արդյունավետության վրա սկզբնական հանքաքարի և ՀՄՏՀ-ի ելքային բնութագրերի փոփոխությունների ազդեցությունը հաշվի առնելու անհրաժեշտությունը [2, 11]:
- 2. Մշակվել է պղնձամոլիբդենային հանքանյութերի ֆլոտացման տեխնոլոգիական գործընթացի հավանականային կառավարման խնդրի ընդհանրական մաթեմատիկական մոդել, որը, շնորհիվ ֆլոտացման արդյունավետության վրա սկզբնական հանքաքարի և ՀՄՏՀ-ի ելքային բնութագրերի պատահական փոփոխությունների ազդեցության հաշվառման, դետերմինացված խնդրի մոդելի համեմատ օժտված է ավելի բարձր համարժեքությամբ [2, 11]:

- 3. Առաջարկվել է վիրտուալ օբյեկտի նմանակային մոդել, որը հնարավորություն է ընձեռում քոմփյութերային գիտափորձերի միջոցով գնահատել մոդելավորման մրցակցող մեթոդների արդյունավետությունը մոդելավորվող օբյեկտի ֆիզիկական ու համակարգային օրինաչափությունների արտացոլման հնարավորության տեսանկյունից [1, 5, 6, 10, 12]։
- 4. ՋՊՄԿ-ի ՀՄՏՀ-ի մանրացման սարքավորումների հուսալիության վերաբերյալ եռամյա ժամանակահատվածում հավաքված վիճակագրական տվյալների հիման վրա նույնականացվել են մանրացման սարքավորումների հարևան խափանումների միջև աշխատաժամանակի և վերականգնման ժամանակի բաշխման ֆունկցիաները [8]։ Այդ ֆունկցիաների օգտագործմամբ մշակվել է ՀՄՏՀ-ի սարքավորումների աշխատունակության փոփոխության գործընթացի նմանակային մոդելը, որը շնորհիվ մոդելավորող ալգորիթմի կառուցմանն մոդուլային սկզբունքի և ռեգիստրային մեթոդի կիրառության օժտված է որոշակի ճկունությամբ և ունիվերսալությամբ [9]։
- 5. Պրոբլեմակողմնորոշված ստրատիֆիկացված ձևայնացման մեթոդի և ընդհանրական ստրատիֆիկացված մոդելի կիրառությամբ մշակվել է ՀՄՏՀ-ի գործունեության գործընթացի եռամակարդակ հիերարխիկ քոմփյութերային մոդելը [2, 4], ինչի շնորհիվ հաջողվել է հաղթահարել ՀՄՏՀ-ի հնարավոր վիճակների տարածության մեծ չափողականությունը։
- 6. Անմիջական գնահատման եղանակով անցկացված փորձագիտական հարցումների արդյունքների հիման վրա LabVIEW միջավայրում մշակված ծրագրալին են «EXPERT» փաթեթի օգնությամբ որոշվել 2ՊՄԿ-h հանքանլութերի պղնձամոլիբդենային Ֆլոտազման տեխնոլոգիական գործընթացի մաթեմատիկական մոդելի առավել կարևոր փոփոխականները [3]։
- 7. Կառուցվել է ՀՄՏՀ–ի ելքային միջակայքային բնութագրերի ձևավորման քոմփյութերային մոդելը, որը թույլ է տալիս ութժամյա ժամանակահատվածում ՀՄՏՀ–ի գործունեության հավանականային գործընթացի իրացումների հիման վրա ձևավորել համակարգի միջին հերթափոխային բնութագրերի արժեքները [7]։
- 8. Կառավարման խնդրի առաջարկված ընդհանրական մաթեմատիկական մոդելի կիրառությամբ LabVIEW ծրագրային միջավայրում մշակվել է ԶՊՄԿ–ի պղնձամոլիբդենային հանքանյութերի ֆլոտացման տեխնոլոգիական գործընթացի հավանականային կառավարման քոմփյութերային մոդել, որը, ի տարբերություն գոյություն ունեցող համանման մոդելների, հաշվի է առնում սկզբնական հանքաքարի բնութագրերի և սարքավորումների խափանումների հետևանքով ՀՄՏՀ-ի ելքային բնութագրերի փոփոխությունների ազդեցությունը ֆլոտացման արդյունավետության վրա։ Դրա շնորհիվ հաջողվել է զգալիորեն բարձրացնել կառավարման մոդելի համարժեքությունը՝ հնարավորություն ընձեռելով ստանալ ֆլոտացման գործընթացի օպտիմալ կառավարման խնդրի առավել ճշգրիտ լուծումներ [2, 11]։

9. Պղնձամոլիբդենային հանքանյութերի ֆլոտացման տեխնոլոգիական գործընթացի մշակված կառավարման քոմփյութերային մոդելը և ֆլոտացման մաթեմատիկական մոդելի կարևորագույն փոփոխականների որոշման «EXPERT» ծրագիրը ընդգրկվել են ՀՊՄԿ-ի ֆլոտացման տեխնոլոգիական գործընթացի ավտոմատացված կառավարման համակարգի հատուկ ծրագրային ապահովման կազմում։ Կառավարման մոդելի ներդրման շնորհիվ սպասվող տնտեսական արդյունքը, համաձայն ներդրման ակտի, կազմում է կոմբինատի տարեկան շահույթի շուրջ 1,5%-ը՝ ի հաշիվ պղնձամոլիբդենային հանքանյութի ֆլոտացման գործընթացի կառավարման որակի բարելավման միջոցով նրա արդյունավետության բարձրացման։

GEVORGYAN HERMINE

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF COMPUTER MODEL FOR CONTROL OF THE COPPER-MOLYBDENUM ORES FLOTATION TECHNOLOGICAL PROCESS

SUMMARY

The thesis is devoted to the development, research and practical application of a computer model for the stochastic control of the copper-molybdenum ore flotation technological process taking into account of the influence of changes of the original ore characteristics and output characteristics of the process of ore grinding technological system (OGTS) due to failure of its equipment on the flotation efficiency.

- 1. The necessity and feasibility of considering of the problem of optimal control of ore flotation process as a stochastic programming problem was substantiated. The necessity of taking into account the effect of changes of the output characteristics of OGTS and initial ore characteristics on the efficiency of the ore flotation process in solving this problem was shown [2,11].
- 2. The generalized mathematical model for the problem of stochastic control of technological process of copper-molybdenum ore flotation was developed which, due to considering the influence of random changes of the output characteristics of OGTS and of original ore, compared to models of a deterministic task, has a high adequacy [2, 11].
- 3. A simulation model of the virtual static object was proposed, which allow by carrying out computer experiments to assess the effectiveness of competing methods of modeling from the point of view of their ability to identify physical and systemic patterns of the modeled objects [5, 6, 10, 12].
- 4. On the basis of statistical data on the reliability of the OGTS's equipment of the Zangezur copper-molybdenum combine (ZCMC), collected during the three years of its exploitation, a functions of probability distribution of the operating time between failures and recovery time of grinding equipment were identified [8]. Using these functions the simulation model of their operability change process was developed, which, thanks to the use of the modular principle and register method of constructing a modeling algorithm has a certain flexibility and versatility [9].

- 5. A three-level hierarchical computer model of functioning process of OGTS was developed with the use of problem-oriented method of stratified formalization and generalized stratified model, which helped to overcome the large dimensionality of the state space of the system [2,4].
- 6. Based on the results of the expert survey, conducted by the direct estimation method using the software package "EXPERT", developed in the LabVIEW environment, the important variables of the mathematical model of the copper-molybdenum ore flotation technological process was determined [3].
- 7. A computer model of the formation interval output characteristics of OGTS, which allows on the basis of the realization of random functioning of OGTS in an eight-hour time interval to generate time-weighted average values of the output characteristics [7].
- 8. With the use of the proposed generalized mathematical model of the control task a computer model for the stochastic control of the copper-molybdenum ore flotation technological process in the LabVIEW environment was developed, which, in contrast to the existing similar models, takes into account the effect on the efficiency of the flotation the changes of characteristics of initial ore and changes of output characteristics of OGTS due to its equipment's failure [2, 11]. This allowed significantly improve the adequacy of the control model that produces more accurate solutions of problem of the optimal control of the flotation process.
- 9. Developed computer model for control of the copper-molybdenum ore flotation technological process and the software package "EXPERT" for definition of the major variables of the mathematical model of flotation was included in the composition of the special software of automated control system of flotation technological process of ZCMC. The expected economic effect from the introduction of developed computer model, according to the act on the implementation, is about 1,5% of the annual net profit of ZCMC, by increasing the efficiency of flotation process through improving the quality of control.