

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 9, №2 (2017) <http://naukovedenie.ru/vol9-2.php>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/53TVN217.pdf>

Статья опубликована 10.04.2017

Ссылка для цитирования этой статьи:

Затонский А.В., Варламова С.А., Малышева А.В., Мясников А.А. Использование видеографической информации для уточнения динамической стохастической модели процесса флотации калийной руды // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №2 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/53TVN217.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 544.77:004.622

Затонский Андрей Владимирович

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, Пермь
Березниковский филиал, Россия, Березники¹

Заведующий кафедрой «Автоматизации технологических процессов»

Доктор технических наук, профессор

E-mail: z xenon@narod.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1863-2535>

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_items.asp?id=158505

SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56069394200>

Варламова Светлана Александровна

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, Пермь
Березниковский филиал, Россия, Березники

Доцент

E-mail: varlamovasa@mail.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_items.asp?id=604279

SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56047616400>

Малышева Анна Владимировна

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, Пермь
Березниковский филиал, Россия, Березники

Аспирант

E-mail: akchim@mail.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_items.asp?id=833992

Мясников Антон Александрович

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, Пермь
Березниковский филиал, Россия, Березники

Студент

E-mail: hanjimono@ptpm.ru

**Использование видеографической информации
для уточнения динамической стохастической модели
процесса флотации калийной руды**

Аннотация. Показана необходимость автоматического определения параметров процессов шламовой и сильвиновой флотации калийных руд путем использования видеоизображений пены флотационных машин. Для накопления статистических характеристик

¹ 618404, Пермский край, г. Березники, ул. Тельмана, 7

создано специальное программное обеспечение, эффективно обрабатывающее базу данных изображений. Данное программное обеспечение может использоваться как для исключения человеческого фактора при определении параметров и динамики пенного слоя, так и для настройки системы поддержки принятия решений по данным нескольких периодов наблюдений. Разработана корневая модель пенного слоя как объекта управления. Показана связь между параметрами пены и качеством конечного продукта. Приведены нечеткие переменные и правила вывода для принятия решений оператором флотации. Обоснована необходимость использования динамических характеристик пенного слоя при управлении флотацией. Построена модель флотационной машины сильвиновой флотации калийных руд в условиях ПАО «Уралкалий» с учетом динамики пенного слоя, стохастических характеристик процессов и периодического действия пеногона. Произведено сравнение результатов моделирования с детерминированным вариантом. Исследование статистических характеристик модели показало, что стохастические параметры эффективности флотации оказывают определяющее влияние на процесс по сравнению со стохастическими параметрами пеногона.

Ключевые слова: калийная руда; процесс флотации; моделирование; техническое зрение; анализ изображений; нечеткие правила; управление; поддержка принятия решений

Постановка задачи

Верхнекамское месторождение калийных руд является одним из самых крупных месторождением мира. Оно же является единственной разрабатываемой сырьевой базой калийной промышленности России. Обогащение руд, в том числе калийных, методом флотации производят по различным технологическим схемам. Технология переработки сильвинитовой руды на Верхнекамских калийных комбинатах включает следующие стадии [12, 8]:

- подготовительные - сухое дробление руды, мокрое измельчение, операцию классификации исходной руды и слива мельницы;
- основные операции - предварительное гидромеханическое и флотационное обесшламливание сильвинитовой пульпы, разделение сильвина и галита флотационным методом, перечистные операции флотации чернового сильвина и черновых шламов (рис. 1);
- вспомогательные операции - обезвоживание и удаление солевых отходов, удаление отвальных шламов, приготовление водных растворов реагентов.

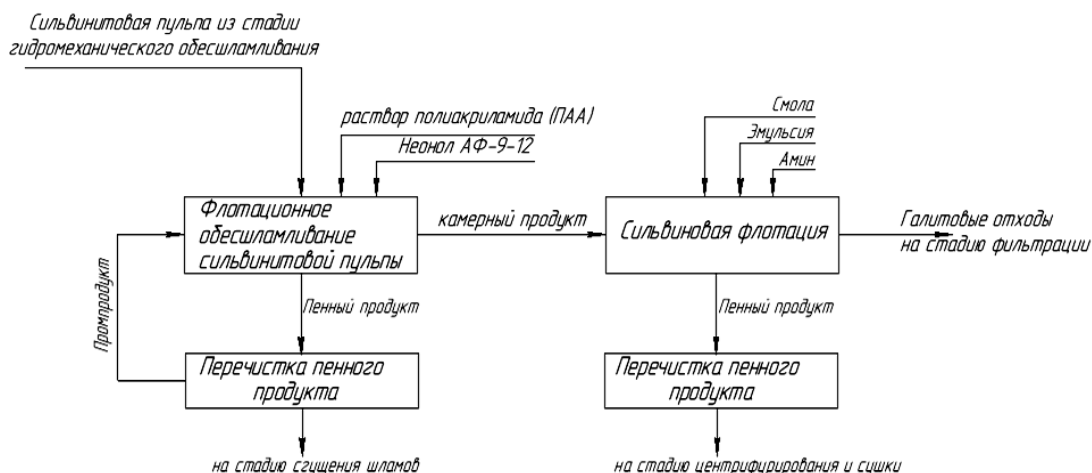


Рисунок 1. Краткая схема стадий флотационного процесса на примере флотационной обогатительной фабрики Второго Березниковского калийного производственного рудоуправления ПАО «Уралкалий», г. Березники Пермского края (источник: [8])

Флотационная переработка водорастворимых калийных руд осуществляется в насыщенном по хлоридам калия и натрия солевом растворе - маточном растворе. При этом через смесь частиц с водой пропускают мелкие пузырьки воздуха, частицы определённых минералов собираются на поверхности раздела фаз «воздух-жидкость», прилипают к пузырькам воздуха и выносятся с ними на поверхность в составе пены [7]. Качество конечного продукта существенно зависит от структуры и внешнего вида пены сильвиновой флотации. Для принятия оперативных решений операторы флотации производят визуальную оценку пены, а именно: цвет пены, размер пузырьков, размер и цвет нерастворимого остатка (минерализация); плотность пены; на шламовой флотации - ровность пены. Однако внешняя оценка пены даже для опытного флотатора является достаточно субъективной. Как следствие, результаты могут отличаться от смены к смене и давать противоречивые результаты процесса.

Обычно флотационную машину (ФМ) моделируют как последовательность ячеек идеального перемешивания [2]. При шламовой флотации с пеной уносится нерастворимый остаток, при сильвиновой - полезный продукт (рис. 2). На рисунке обозначены q - объемный расход пульпы, p - доля полезного компонента, n - доля загрязняющего компонента в пульпе, Q_p - объемный расход полиакриламида. Индексы 1, 2 и 3 обозначают входной и два выходных потока флотомашин.

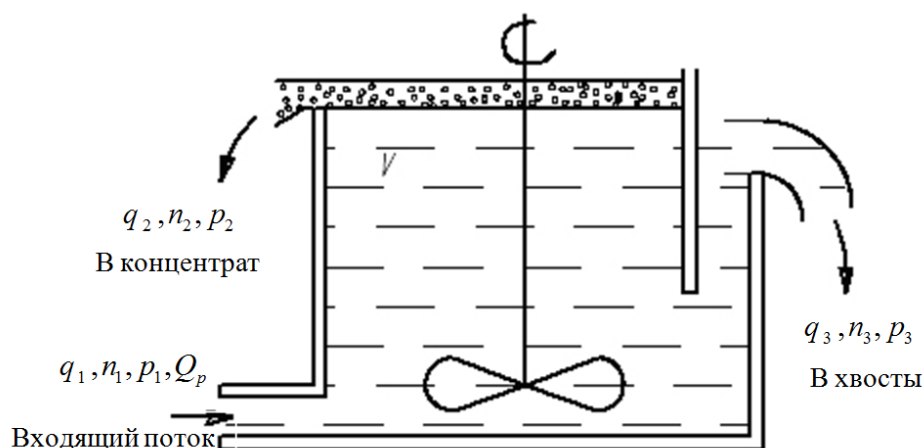


Рисунок 2. Схема флотационной камеры (разработано авторами)

Недостаток такого подхода к моделированию заключается в том, что не учитывается стохастический характер процессов в ФМ. Кроме того, пена смахивается в приемный лоток пеногонном периодическом действии, что также обычно не учитывается в моделях.

Для построения более точной модели была изучена видеозапись процесса сильвиновой флотации на БКПРУ-2 ПАО «Уралкалий», где используются шестикамерные машины ФКМ-6.3.

Обработка актуальных и исторических видеографических данных

Существует метод определения флотационной активности по изменяющемуся изображению пузырька газа в исследуемой жидкости, что позволяет подобрать оптимальный расход дорогостоящих компонентов, добавляемых в флотомашину. Недостатком этого метода является непосредственное использование человека. Оператор флотационной машины наблюдает за пеной и, на основании своего опыта, изменяет расходы компонентов и производит другие действия, перечисленные в табл. 1.

Таблица 1

**Нечеткие переменные и правила действий оператора основной сальвиновой флотации
(составлена авторами)**

Переменная	Значение	Характеризует	Действия
Цвет хвостов основной сальвиновой флотации	Очень розовый	Содержание хлорида калия в хвостах завышено	Повысить расход аминов
Цвет пенного продукта основной сальвиновой флотации	Очень светлый	Нарушение норм технологического режима основной сальвиновой флотации	Повысить расход аминов И
Минерализация пенного продукта основной сальвиновой флотации	Очень слабая		Снизить расход депрессора
Цвет пены основной сальвиновой флотации	Очень светлый	Повышен расход депрессора	Снизить расход депрессора
Минерализация пены основной сальвиновой флотации	Очень слабая		
Размер пены основной сальвиновой флотации	Крупный	Понижен расход депрессора	Повысить расход депрессора
Размер пены основной сальвиновой флотации	Пена отсутствует	Прекратилась подача воздуха	Возобновить подачу воздуха

Использование человека в контуре управления не позволяет автоматизировать процесс и приводит к снижению точности измерений. Это приводит к нестабильности технологического процесса, перерасходу реагентов и, в итоге, к снижению прибыли. Весомое влияние оказывает также и необходимость длительной подготовки специалистов, достаточно квалифицированных в данной области. Однако главный недостаток заключается в том, что любые решения по изменению процесса остаются субъективным, т.е. человеческий фактор является значимым в управлении [5].

Для решения этой проблемы многие зарубежных предприятия используют техническое зрение. При этом флотационная пена рассматривается как объект автоматического управления (рис. 3) [3].



Рисунок 3. Флотационная пена как объект управления (разработано авторами)

Компьютерное зрение - набор устройств, алгоритмов и методов, позволяющий компьютерам «видеть», то есть получать оперативную видеографическую информацию. Областью применения технического зрения является обычно контроль оборудования, в данном случае - для анализа поверхности пены. На основе математических алгоритмов анализа изображения система технического зрения способна контролировать характеристики пенного слоя, включая скорость схода пены, размер пузырьков, стабильность пены и ее цвет, что, в итоге, обеспечивает объективную статистическую оценку этих переменных. Информация,

полученная от системы технического зрения, может быть использована для непосредственного управления флотацией или, наоборот, для поддержки принятия решений при ручном управлении (рис. 4).

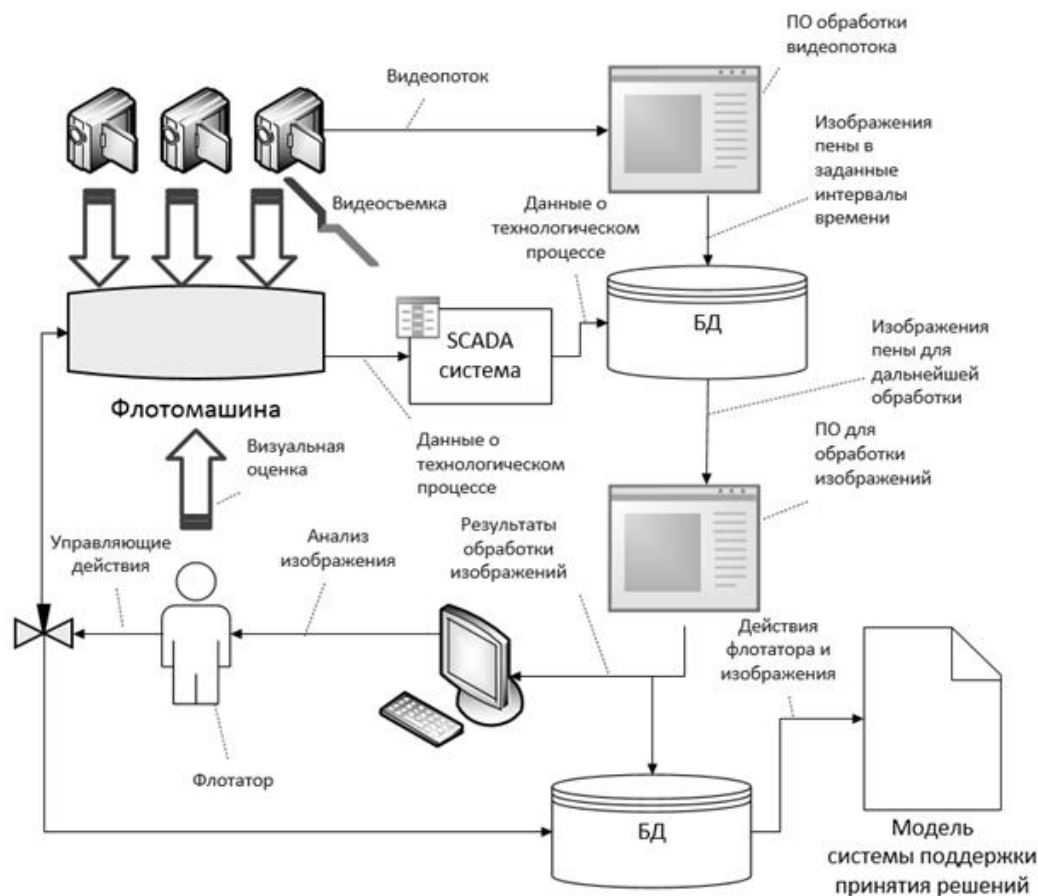


Рисунок 4. Структурная схема управления процессом флотации (разработано авторами)

Существует несколько примеров оснащения флотомашин системами технического зрения: система *Outotec FrothSense™* (фирмы *Outotec*²), *Visio-Froth™* (*Metso Minerals*³) [11]. Однако информации о положительном опыте внедрения таких флотомашин в производство на предприятиях калийной промышленности найдено не было. На основании эффективной бинаризации видеоизображения пены [4] и нового алгоритма распознавания размера пузырей, разработано специальное программное обеспечение (СПО) для расчета статистических характеристик статического пенного слоя [10]. Как видно из таблицы выше, статические характеристики являются основой для принятия решений флотатором. Но последний также учитывает и динамику движения пены, ее «вязкость» (как выражаются сами флотаторы, а точнее - насколько динамично пена продвигается к пеногону после смахивания ее порции в лоток).

СПО позволяет как обрабатывать ранее записанные видеофайлы, так и работать непосредственно с видеопотоком, выдаваемом подключенной к компьютеру камерой. На

² Outotec FrothSense™ //

http://outotec.com/ImageVaultFiles/id_735/d_1/cf_2/OTE_Outotec_FrothSense_eng_web.PDF

³ Minerals Processing Solutions Automation //

[http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/0AF54610F6C67DDBC2257B030037F030/\\$File/Automation%20ENGLISH%20Low%20Res.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/0AF54610F6C67DDBC2257B030037F030/$File/Automation%20ENGLISH%20Low%20Res.pdf)

экране монитора в реальном времени выводится подробная информация о процессе флотации, а именно статические и динамические характеристики (рис. 5). Однако, для дальнейшего обучения системы поддержки принятия решений (СППР), необходимо использовать также данные, накопленные в предыдущие периоды наблюдений [6]. Это обусловлено тем, что настройки алгоритмов СППР должны подстраиваться под изменяющийся процесс, поэтому собирать, накапливать и анализировать информацию необходимо постоянно. Для реализации этой функции используется база данных.

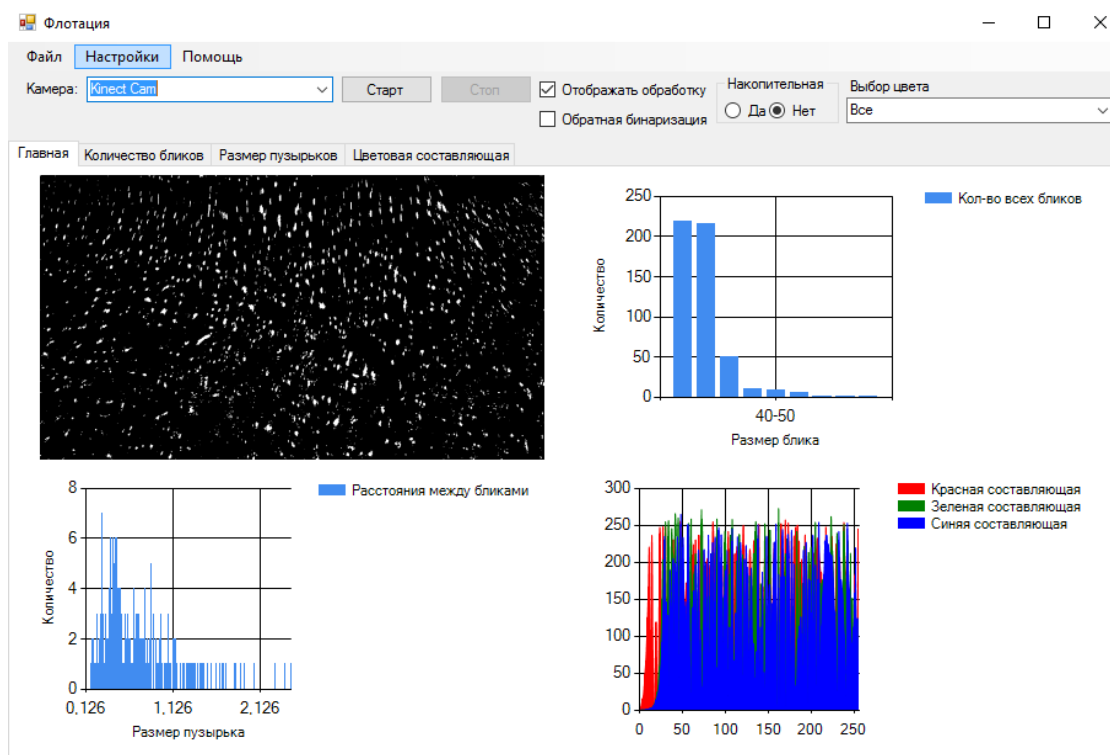


Рисунок 5. Интерфейс основного окна СПО (разработано авторами)

Для работы с базой данных разработана информационная модель (рис. 6). Основной таблицей является «Флотация», в которой хранится лишь дата проведения эксперимента. Если хранить каждый обработанный кадр, то скорость работы программы существенно снизится, а размер базы данных быстро становится неприемлемым для компьютера средней мощности. Чтобы избежать этой проблемы, в базе хранится только каждый N -ый кадр, где N можно указать в настройках программы. При измерении статических характеристик, в частности размеров пузырьков, значения разных экспериментов могут значительно отличаться, в особенности в дробной части, что сильно затрудняет как оценку этих параметров системой, так и восприятия их пользователем [1]. Для решения этой проблемы во время хранения статические параметры делятся на карманы, размер и границы которых можно также указать в настройках программы. При хранении динамических характеристик достаточно указать их текущие значения для данного кадра.



Рисунок 6. Информационная модель СПО (разработано авторами)

Для проверки работы базы данных в программе был реализован интерфейс для просмотра информации по предыдущим экспериментам. Пользователю предлагается выбрать дату и номер проводимого опыта, после чего для каждого конкретного кадра можно посмотреть сохраненные характеристики из базы (рис. 7).

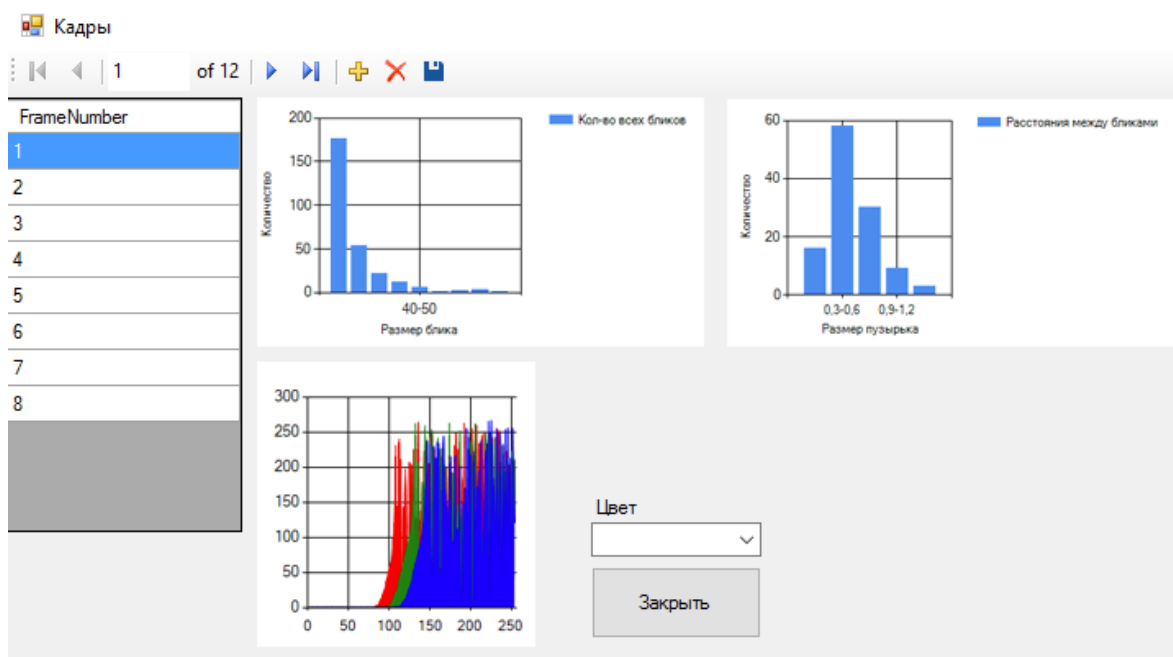


Рисунок 7. Демонстрация работы СПО с базой (разработано авторами)

Уточнение стохастической модели

С использованием СПО определили, что пена подходит к пеногону со средней задержкой от 0 до 6.5 с, в зависимости от места ее образования. Пеногон смахивает пену с частотой $1/3 \text{ с}^{-1}$, пеногоны соседних камер развернуты под прямым углом, то есть имеют сдвиг

по фазе на 90° . Продолжительность смахивания пены 0.4-0.6 с в зависимости от ее количества (рис. 8).



*Рисунок 8. Исходное видеографическое изображение флотомашины
(разработано авторами)*

Приняли следующие допущения [9]:

1. Эффективность пеногона близка к 1, может незначительно отличаться в сторону уменьшения. Этому соответствует статистическое распределение Пуассона f_n при $\lambda = 1$. Чтобы получить эффективность в пределах $0.9 \dots 1$, необходимо вычислить $1 - f_n/50$.
2. Эффективность самого процесса флотации опишем нормальным распределением вблизи расчетного значения.
3. На сильвиновую флотацию подается пульпа плотностью $\rho \approx 1395 \text{ кг/м}^3$ с отношением Ж:Т $\approx 2.5 \dots 2.7$. Примем его равным 2.5. Т.к. Ж + Т = 1, очевидно, что $T = 1/3.5 \approx 0.28$. При идеальном отборе твердой фазы и равномерном отборе продукта из всех ячеек получим среднюю долю массового отбора продукта $0.28/6 \approx 0.047$ из каждой ячейки.
4. Остальные параметры модели возьмем из [2] - это постоянная времени ячейки ФМ по каналу пульпы, равная 1.9; постоянная времени из расчета времени пребывания пены в пенном слое без учета седиментации, равная 7.6 и т.д.

Получили стохастическую модель флотации, фрагмент которой (первая ячейка) приведен на рис. 9. Вся модель слишком объемная, чтобы приводить ее в виде одного рисунка.

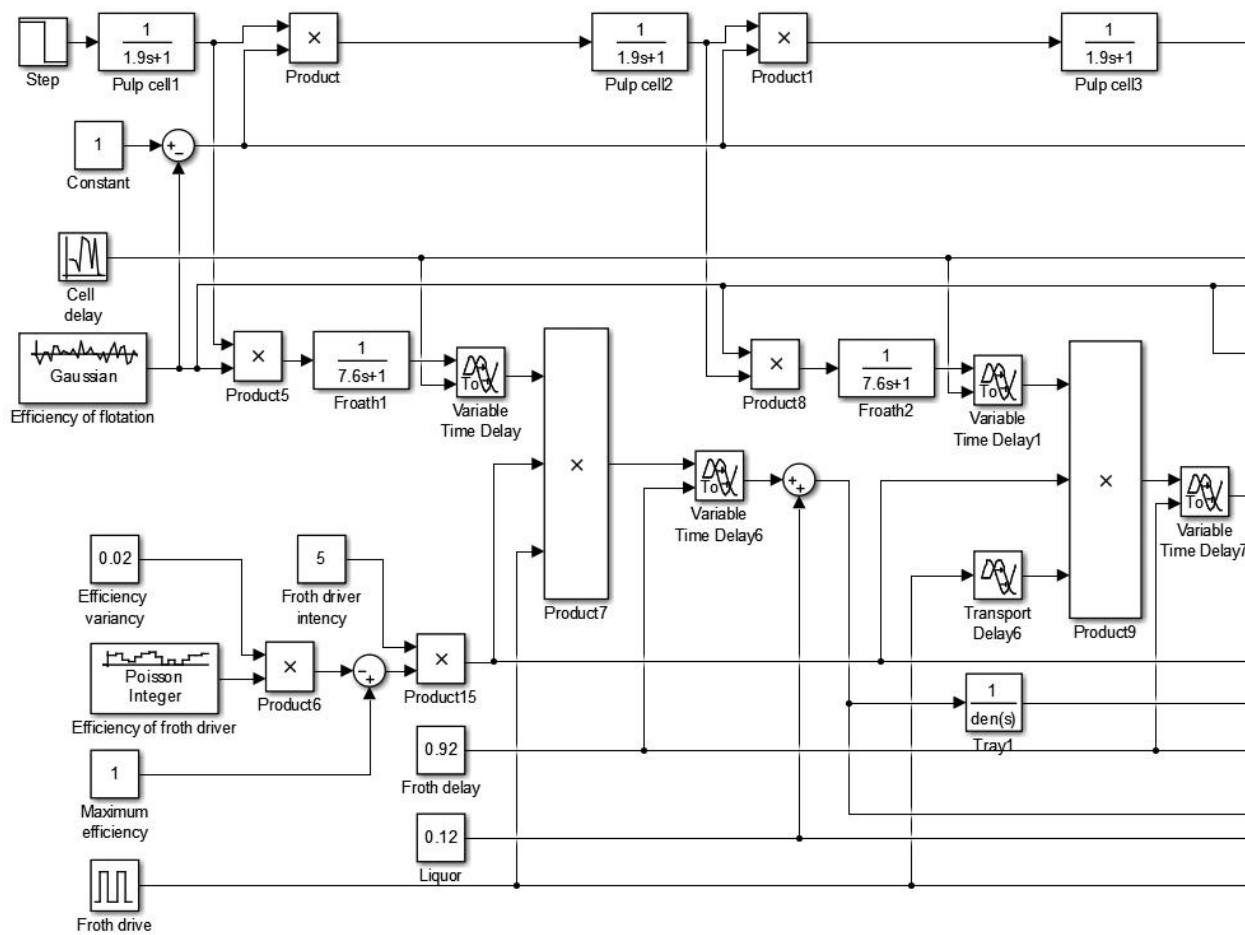


Рисунок 9. Фрагмент стохастической модели флотационной машины в Simulink
(разработано авторами)

Здесь блок «Step» моделирует нормированное значение расхода пульпы с шламовой флотации (от 0 до 300 с оно равно 1, далее 0.9); блок «Cell delay» моделирует случайное время движения пены по ячейке до пеногона, от 0 до 6 секунд, в среднем - 3 с разбросом ± 2.5 с, равномерное распределение; блок «Efficiency of flotation» моделирует случайную долю массового отбора из ячейки (среднее значение 0.047 получено выше, нормальное распределение); блок «Efficiency of froth driver» моделирует эффективность пеногона, поскольку оно равно $1 - f_n(\lambda=1)/50$, используется множитель 0.02; блок «Froth driver intensity» является нормирующим и компенсирует 20%-й период времени, в который пеногон смахивает пену в лоток (иначе получили бы только 20% от общего расхода пены); блок «Froth drive frequency» настроен выдавать каждые 3 с. импульс в 20% от периода, то есть 0.6 с. Блок «Transport delay» моделирует задержку продукта в лотке, для 1-й ячейки это 6·0,92 с., для 2-й - 5·0,92 и т.д. Блок «Liquor» моделирует добавку в лоток маточного раствора или рассола, значение подобрано таким образом, чтобы при нормированной интенсивности расхода пульпы с шламовой флотации, равной 1, на выходе получалось нормированное значение расхода продукта флотации, также равное 1. Блок «Tray1» моделирует перемешивание маточного раствора и продукта флотации первой ячейки до добавления пены из второй ячейки; он реализован в качестве диффузионного звена 2-го порядка. Массовая доля пены, попавшая в лоток, вычитается из потока пульпы в каждой ячейке. Вывод в MS Excel реализован при помощи блока simout и с использованием функции xlswrite.

На рис. 10 представлено сравнение стохастического и детерминированного процессов во флотомашине. Для получения детерминированного результата моделирования все

стохастические источники были отключены. На рисунке по оси абсцисс - время (с), по оси ординат - относительный выход флотомашины в нормированных единицах. Период от 0 до 100 с исключен, так как исследование пусковых режимов ФМ не является целью настоящей работы.

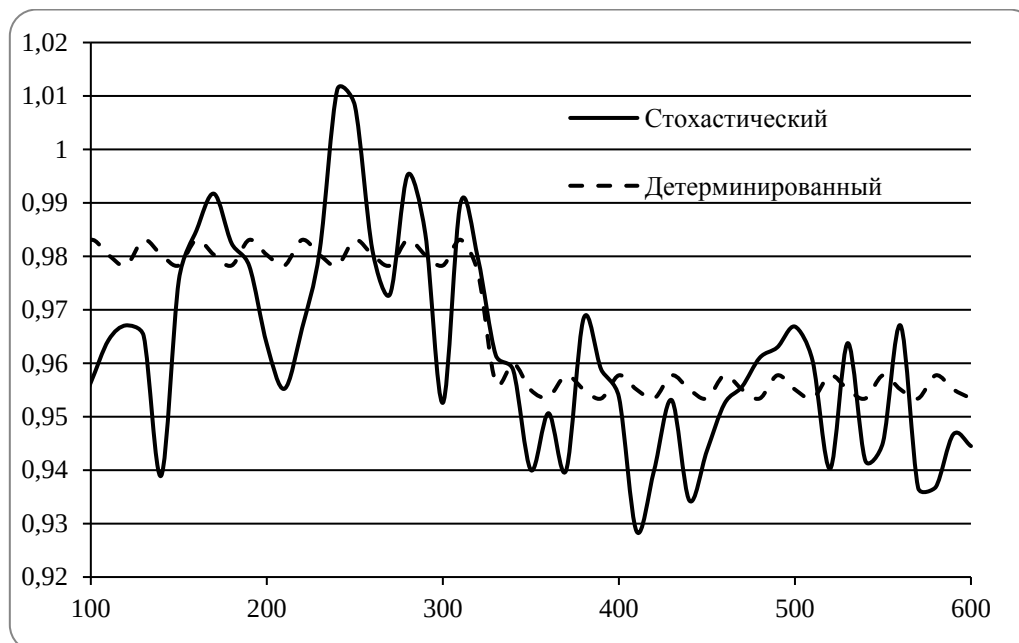


Рисунок 10. Модельные тренды выходной величины флотомашины (разработано авторами)

Исследуем статистические свойства объекта при помощи полученной модели, например, зависимость стандартного отклонения выходного параметра флотомашины от стандартного отклонения статистической эффективности флотации (обозначим ее A , настраивается внутри блока «*Efficiency of flotation*») и параметра разброса эффективности пеногона B (блок «*Efficiency variance*» в модели на рис. 8). Так как модель стохастическая, при каждом запуске результат моделирования несколько изменяется, даже если не изменять входные параметры. Поэтому при изменении на $\pm 5\%$ и $\pm 10\%$ указанных параметров проводим численные эксперименты до тех пор, пока среднее значение в серии не перестанет меняться более чем на 1% при каждом следующем запуске модели. В среднем понадобилось порядка 20-25 экспериментов на каждую ячейку следующей таблицы.

Таблица 2

Результат исследование статистических свойств ФМ (составлена авторами)

Изменение $A \setminus B$	90,00%	95,00%	100,00%	105,00%	110,00%
90,00%	99,40%	99,45%	99,47%	99,47%	99,44%
95,00%	99,79%	99,77%	99,80%	99,78%	99,78%
100,00%	99,79%	99,85%	100,00%	99,84%	99,88%
105,00%	100,38%	100,25%	100,39%	100,33%	100,28%
110,00%	100,22%	100,25%	100,22%	100,20%	100,21%

Методом наименьших квадратов получили двухфакторную линейную модель зависимости стандартного отклонения выходного параметра флотомашины от A и B вида $0,2069 + 1,0584 \cdot A + 0,0039 \cdot B$. Это говорит о том, что параметр эффективности флотации примерно в 250 раз более значим в смысле отклонения выходного параметра флотомашины от детерминированных значений, чем разброс параметров эффективности пеногона.

Выводы

Полученная модель, таким образом, позволяет получить адекватные результаты с использованием видеографической информации и учетом стохастического характера процессов, происходящих во флотомашине, и может быть использована для синтеза системы управления ею или настройки СППР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zatonskiy A.V., Varlamova S.A. Modeling and Information Technologies: Selected Papers of the International Scientific School "Paradigma" (Summer-2015, Varna, Bulgaria) Compiling Editor Dr.Sc., Prof. O.Ja. Kravets. Yelm, WA, USA, 2015. С. 52-56.
2. Беккер В.Ф. Решение технологических проблем действующего производства средствами автоматизации. Т.1: Производство калийных удобрений. Пермь: БФ ПНИПУ, 2012. 312 с.
3. Беккер В.Ф., Плехов П.В., Затонский А.В. Управление средствами производства в системе менеджмента качества химической продукции // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. №9. С. 66-72.
4. Варламова С.А., Мясников А.А. Выбор метода бинаризации для распознавания параметров пены // Новый университет. Серия: технические науки. 2015. №5-6. С. 73-78.
5. Затонский А.В. Программные средства глобальной оптимизации систем автоматического регулирования. М.: ИНФРА-М, ИЦ РИОР, 2013. 136 с.
6. Затонский А.В., Варламова С.А. поддержка принятия решений в задачах со сложными критериями оценки деятельности: шаг за шагом // Новый университет. Серия: Технические науки. 2012. №3 (9). С. 4-21.
7. Затонский А.В., Варламова С.А. Использование бликовых отражений для автоматического распознавания параметров пены при флотации калийных руд // Обогащение руд. 2016. №2. С. 49-56.
8. Курмаев Р.Х. Флотационный способ получения хлорида калия из сильвинита. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т., 1993. 83 с.
9. Малышева А.В. Стохастическая модель процесса флотации калийной руды // Молодежная наука в развитии регионов: материалы Междунар. конф. студентов и молодых ученых (Березники, 26 апреля 2017 г.). Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политех. ун-та, 2017. С. БФ ПГТУ, 2010. - С. 213-215.
10. Мясников А.А., Гайнутдинова К.В. Оценка процесса флотации с использованием компьютерного зрения // Первый шаг в науку. 2016. №11. С. 32-36.
11. Романенко С.А., Оленников А.С. Опыт внедрения видеокамер FROTHMASTER на обогатительной фабрике "Зеленая гора-2" // Обогащение руд, 2014. №2. С. 23-28.
12. Тетерина Н.Н. Технология флотационного обогащения калийных руд / Н.Н. Тетерина, Р.Х. Сабиров, Л.Я. Сквирский, Л.Н. Кириченко. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т., 2002. 484 с.

Zatonskii Andrei Vladimirovich

Perm national polytechnic research university
Berezniki branch, Russia, Berezniki
E-mail: z xenon@narod.ru

Varlamova Svetlana Aleksandrovna

Perm national polytechnic research university
Berezniki branch, Russia, Berezniki
E-mail: varlamovasa@mail.ru

Malysheva Anna Vladimirovna

Perm national polytechnic research university
Berezniki branch, Russia, Berezniki
E-mail: akchim@mail.ru

Maysnikov Anton Aleksandrovich

Perm national polytechnic research university
Berezniki branch, Russia, Berezniki
E-mail: hanjimono@ptpm.ru

Using of video graphic information to clarify a dynamic stochastic model of the potassium ore flotation process

Abstract. The necessity of automatic determination of parameters of processes of slurry and silvine flotation of potassium ores by using video images of foam from flotation machines is shown. Special software has been created to accumulate statistical characteristics in an image database. This software could be used both to exclude the human factor in determining the parameters and dynamics of the foam layer, and to adjust rules of the decision support system based on data from several observation periods. The root model of the foam layer as a control object was developed. The relationship between foam parameters and the quality of the final product is shown. Fuzzy variables and withdrawal rules to make decisions by the flotation operator are given. The necessity of using the dynamic characteristics of the froth layer in the management of flotation is substantiated. A model of a flotation machine for silvine flotation of potassium ores in the conditions of PJSC Uralkali is constructed. The model takes into account the dynamics of the foam layer, the stochastic characteristics of the processes and the periodic action of the foam driver. Comparison of simulation results with deterministic version is made. An investigation of the statistical characteristics of the model has shows the stochastic parameters of the flotation efficiency get main influence on the process in comparison with the stochastic parameters of the foam driver.

Keywords: potash ore; flotation process; modeling; technical vision; image analysis; fuzzy rules; management; decision support