

**Лисовец А. Е., Григорьев Я. Ю.**  
**A. E. Lisovets, Ya. Yu. Grigoriev**

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ РЕАЛИЗАЦИИ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ**

## **OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES BASED ON THE IMPLEMENTATION OF SIMULATION MODELS**

**Лисовец Александр Евгеньевич** – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Alexander E. Lisovets** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Григорьев Ян Юрьевич** – кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по учебной работе Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Yan Yu. Grigoriev** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Vice Rector for Academic Affairs, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** В современном производстве, реализуемом с применением высокотехнологичного оборудования, большую актуальность приобретают задачи мониторинга процессов и повышения их эффективности. Решение таких задач обеспечивается более эффективным использованием ресурсов и своевременной корректировкой параметров технологических процессов. Выявление элементов технологической цепочки, требующих оптимизации, может быть обеспечено созданием имитационной модели, воспроизводящей поведение реального процесса. В работе приводится построение имитационной модели производственного участка, на основе которой формируются правила, обеспечивающие повышение эффективности производства.

**Summary.** In modern production, implemented with the use of high-tech equipment, the tasks of monitoring processes and improving their efficiency are becoming more relevant. The solution of such tasks is provided by more efficient use of resources and timely adjustment of the parameters of technological processes. Identification of the elements of the technological chain that require optimization can be ensured by creating a simulation model that reproduces the behavior of a real process. The paper presents the construction of a simulation model of a production site, on the basis of which rules are formed to ensure an increase in production efficiency.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, оптимизация, эффективность, производство.

**Key words:** simulation modeling, optimization, efficiency, production.

УДК 303.094.7

Имитационное моделирование подразумевает замену реального объекта моделью, описывающей с достаточной точностью реальную систему с протекающими в ней процессами, с целью получения информации об этой системе (см. рис. 1). Целями работы являются исследование возможности оптимизации производственных процессов на основе разработки имитационных моделей и оценка качества полученных результатов.

В качестве объекта исследования рассматривается производство Амурского гидрометаллургического комплекса компании ОАО «Полиметалл». На предприятии производятся первичная обработка, фильтрация и последующая переплавка драгоценных металлов, таких как серебро, золото. Несколько комплексов представляют собой систему определения и поэтапной переработки сырья – конвейерное производство [3] (см. рис. 2).

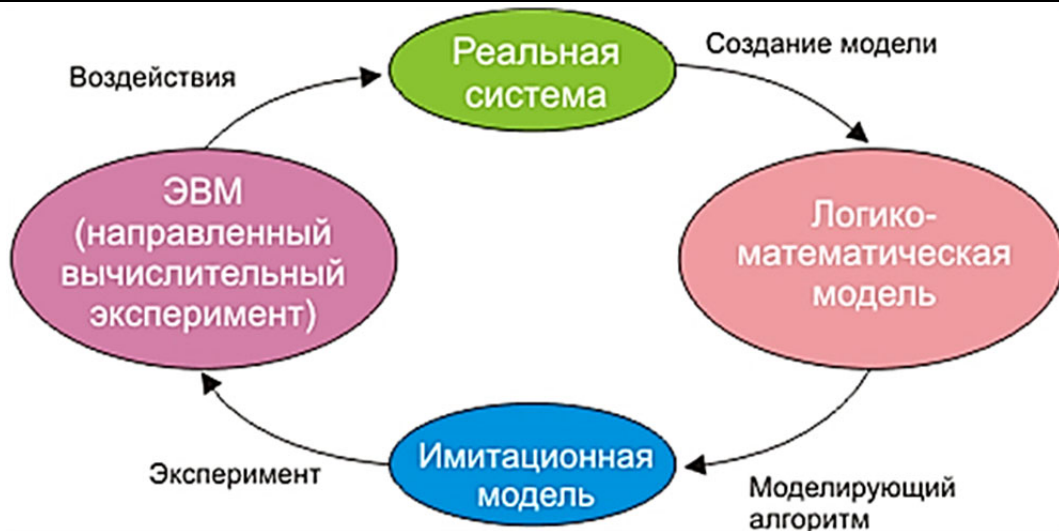


Рис. 1. Схема применения принципа имитационного моделирования

В работе строится модель гидрометаллургического процесса, при котором происходит извлечение металлов из руд, концентратов и отходов различных производств водными растворами химических реагентов с последующим выделением металлов из растворов. На основе данных о реальном производстве создаётся упрощённая блок-схема взаимодействия элементов производства (см. рис. 3). Учитываются физические особенности технологических этапов производства.



Рис. 2. Амурская ГМК в реальной системе



Рис. 3. Схема Амурской ГМК

На примере определённого этапа создаётся логическая модель, полностью соответствующая структуре этапа подготовки концентрата (см. рис. 4).

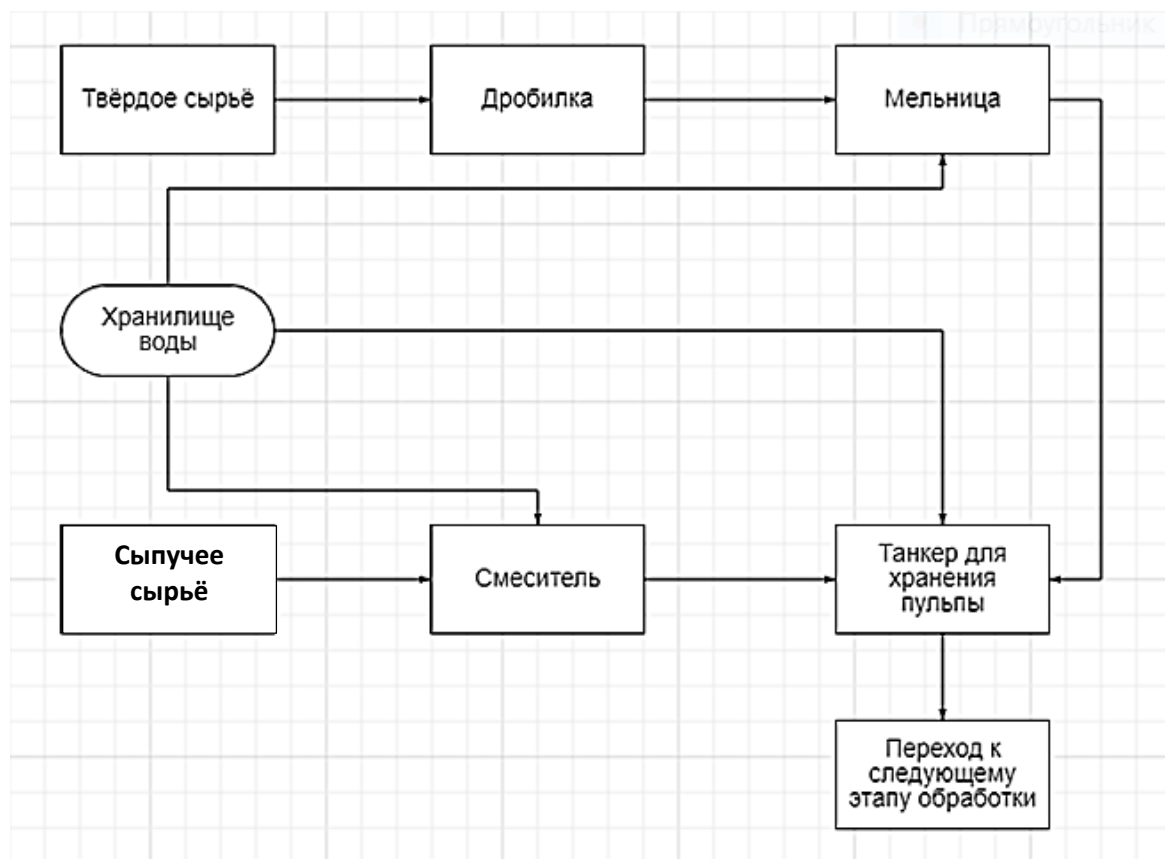


Рис. 4. Схема этапа подготовки концентрата

Имитационная модель позволяет сформировать набор статистических данных на основе моделируемой серии экспериментов и обеспечить реализацию оптимизационных схем. Моделирование осуществляется в среде «AnyLogic Personal Learning Edition» версии 8.6.0, включающей инструментарий для воспроизводства производственных и экономических процессов. Логическая схема рассматриваемого предприятия разрабатывается с применением принципов логического программирования и блок-схем. На основе разработанной логической схемы создаётся имитационная модель с использованием модульного конструктора (см. рис. 5).

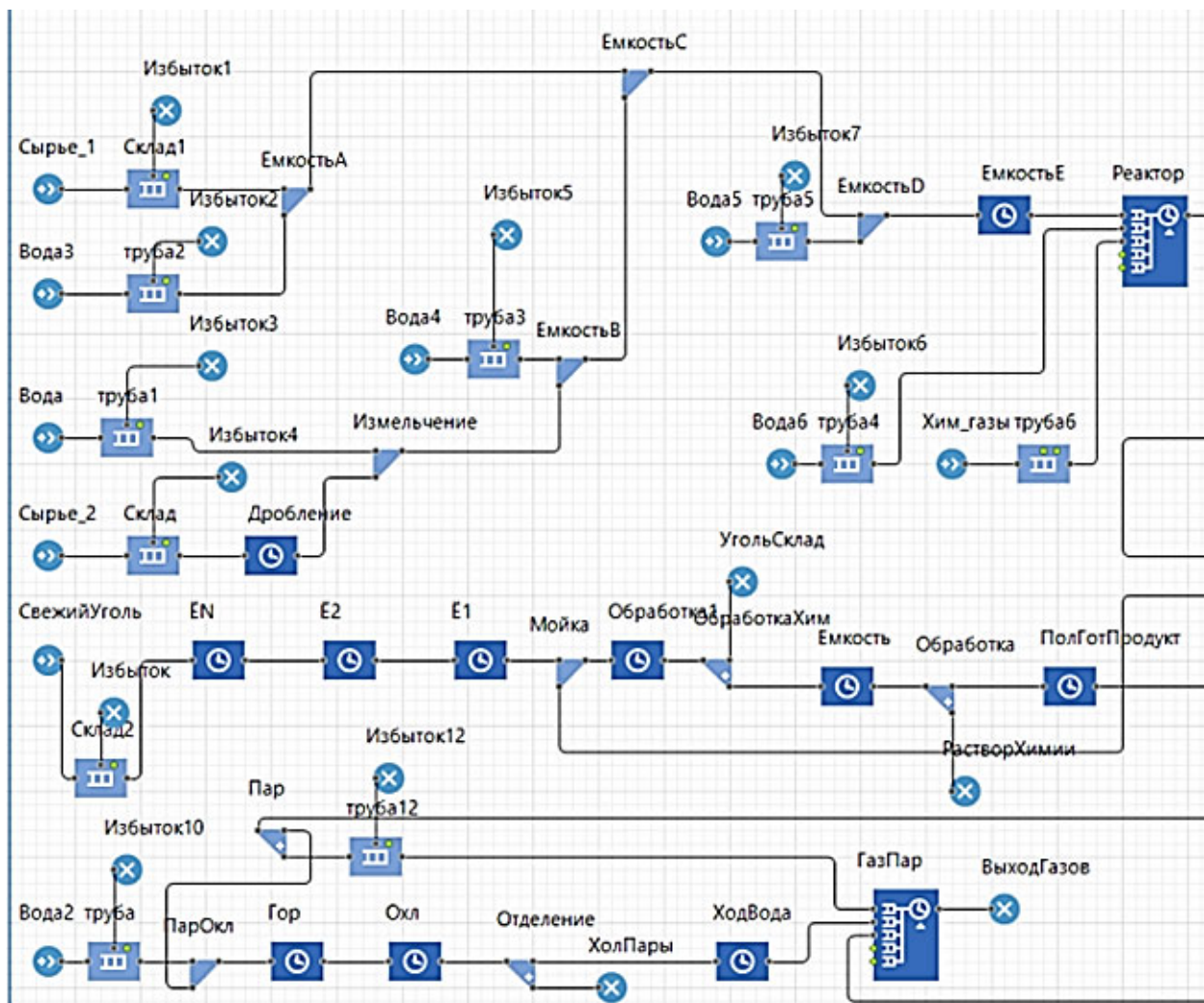


Рис. 5. Логическая интерпретация модели

При разработке используется трёхмерная графическая интерпретация модели, обеспечивающая лучшее представление для операторов модели (см. рис. 6). Оптимизационный процесс обеспечивается непосредственно с применением графического интерфейса, что позволяет обеспечить большую скорость интерпретации изменений модели. Данный подход позволяет исключить необходимость проведения реальных экспериментов на производстве, а при наличии достаточно больших данных, задающих характеристики производственных процессов, находить узкие места, опираясь на технологические параметры [4].

Для разработки модели используются как стандартные объекты разметки пространства, так и новые элементы, такие как дробящий механизм и мельница или центрифуга. Технология сегментированного конвейера упрощается для лучшей производительности и повышения быстродействия модели.

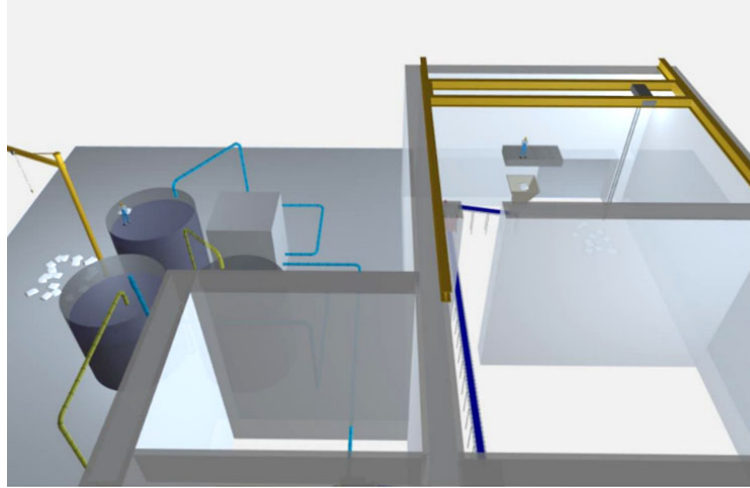


Рис. 6. Трёхмерная анимация модели

На основе разработанной имитационной модели, демонстрирующей работу производства в отрасли металлопереработки, обеспечивается выявление слабых мест в производственном цикле. Реализуется план поэтапной оптимизации технологического процесса [5].

Для выявления закономерностей в работе используется регрессионная модель:

$$y = f(x, b) + \xi, E(\xi),$$

где  $b$  – параметры модели;  $\xi$  – случайная ошибка модели.

Регрессионная функция имеет вид

$$f(x, b) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k,$$

где  $b_j$  – параметры регрессии;  $x_j$  – регрессоры;  $k$  – количество факторов модели.

Многokrатно произведённый эксперимент определяет набор данных, используемых при построении регрессионной модели [6] (см. рис. 7).

Полученные функциональные связи позволяют прогнозировать развитие исследуемых процессов. Выявляются линейные связи для твёрдого и сыпучего сырья:

– для твёрдого вещества

$$y = 0,7489 \cdot x + 0,0737;$$

– для сыпучего вещества

$$y = 0,2779 \cdot x + 2,8921.$$

Полученные зависимости показывают на простой в связи с нехваткой сыпучего вещества (см. рис. 8).

Количество сыпучего сырья, обрабатываемого в рамках производства модели технологического процесса, на порядок меньше обрабатываемого твёрдого материала. Рассчитываются коэффициенты, определяющие повышение притока сыпучего сырья. Так как скорость его обработки заметно ниже, чем у твёрдого сырья, предполагается увеличение поступаемого сырья для зоны смешения сыпучего материала с водой. Увеличение диапазона времени принятия твёрдого вещества позволяет синхронизировать потоки без потери изначального плана производства. Определяется коэффициент увеличения притока сыпучего сырья, обеспечивающий синхронизацию технологических процессов, в размере 2,79 (см. рис. 9).

Кол-во твёрдого сыра	Время	Кол-во сыпучего сыра	Время
0	3	3	3
3,4	7	5,1	7
11,1	10	7,1	10
11,7	13	7,4	13
13,4	17	6,9	17
15	20	8,2	20
17,4	23	10	23
18	27	13,1	27
22,6	30	10,5	30
0,5	3	4	3
3,2	7	3,4	7
10,9	10	6,8	10
11	13	7,3	13
14	17	7,2	17
16	20	9,3	20
16,9	23	11,3	23
19,1	27	10,6	27
24	30	12,8	30
1	3	5,2	3
4,1	7	4,8	7
10,6	10	4,6	10
13,2	13	8	13
13,1	17	8,3	17
14,3	20	8,7	20
17,9	23	9,3	23
19,3	27	10,2	27
20,5	30	11,9	30

Рис. 7. Статистика проведения экспериментов

### Динамика обработки сыра

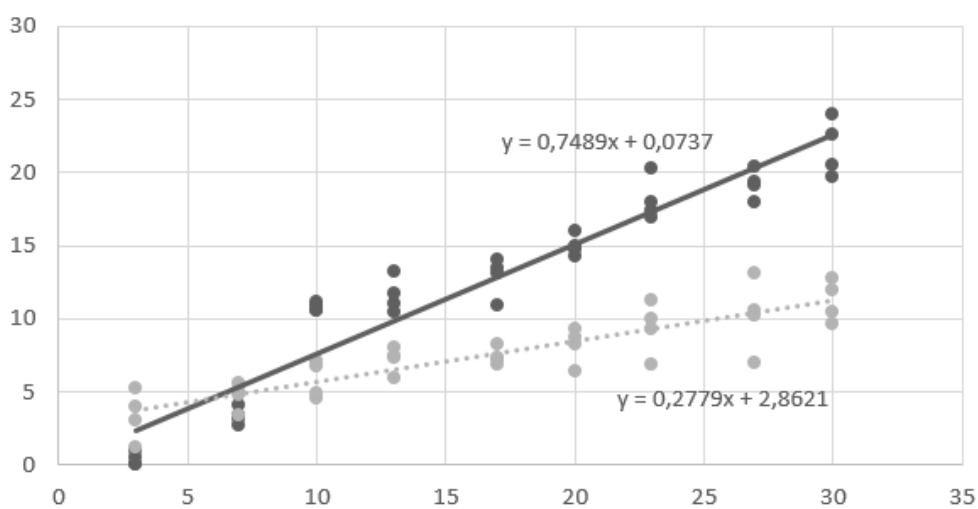


Рис. 8. График линейной регрессии

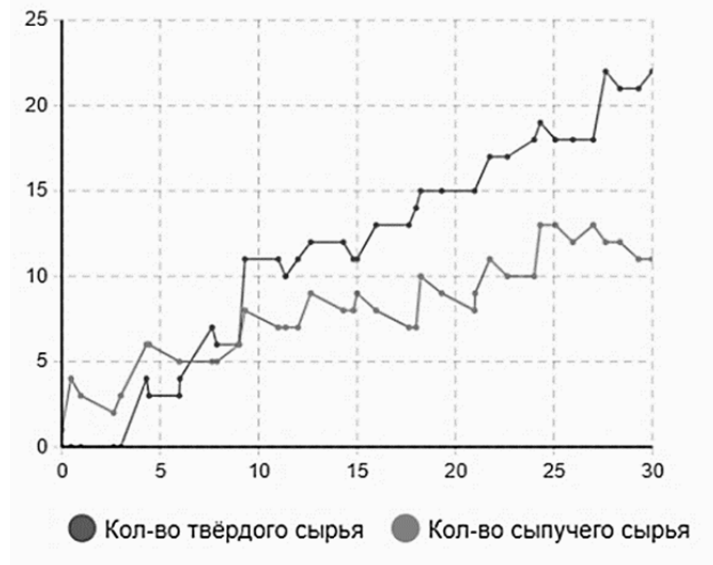


Рис. 9. Диаграмма используемого материала

Составление зависимости предполагает сбор статистических данных и объединение их в датасет, построение регрессионной модели (см. рис. 10). В результате определяется отношение твёрдого к сыпучему материалу, которое составляет 3 к 4. Время на подготовку для обработки сыра принимает постоянную величину. Возникновение случайных заторов на протяжении нескольких экспериментов является погрешностью построения технологического процесса производства, влекущей за собой неизбежные потери, причиной которых является человеческий фактор.

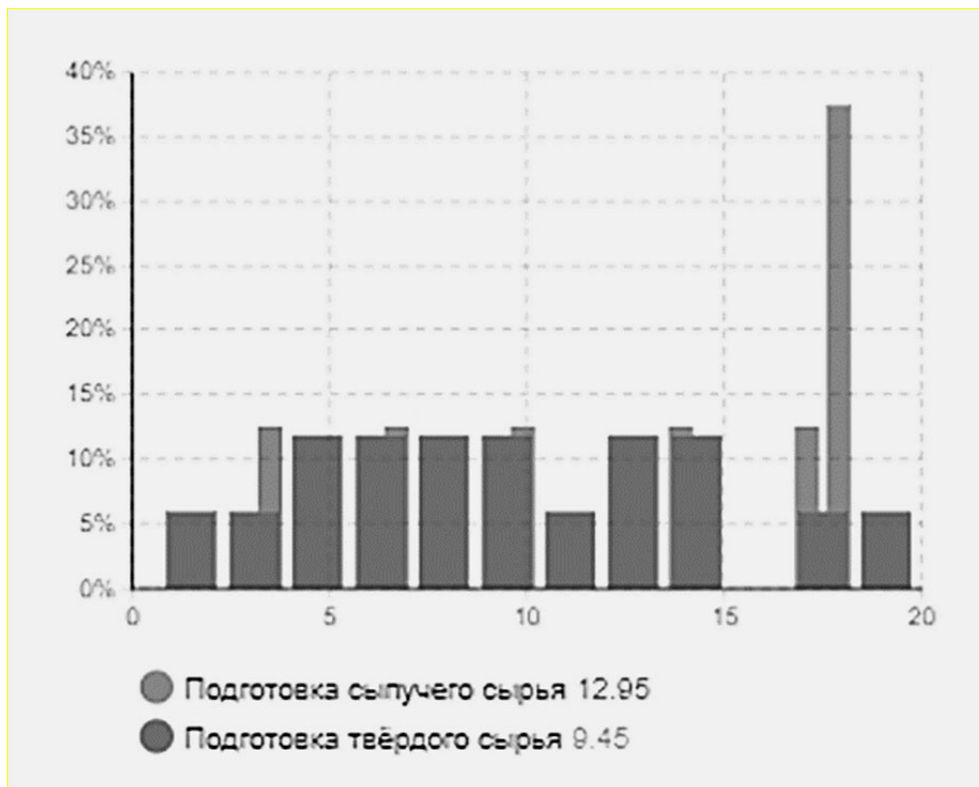


Рис. 10. Гистограмма материала после применения коэффициента линейной регрессии

В качестве альтернативной зависимости для последующей оптимизации рассматриваются другие, нелинейные зависимости, например квадратичная регрессия:

$$y = a * x^2 + b * x + c + e.$$

Для рассматриваемого набора данных функция имеет вид

$$y = 0,017 * x^2 + 1,006 * x + 0,295.$$

Оценка корреляционных показателей указывает на надёжность уравнения и качество получаемых на его основе данных. Достоверность полученных значений наблюдается на уровне 94. Однако сравнение полученных результатов с помощью линейной зависимости, а также различными нелинейными функциями указывает на эффективность применения именно линейной регрессии для оценки исследуемого процесса. Графики регрессионных моделей приведены на рис. 11.

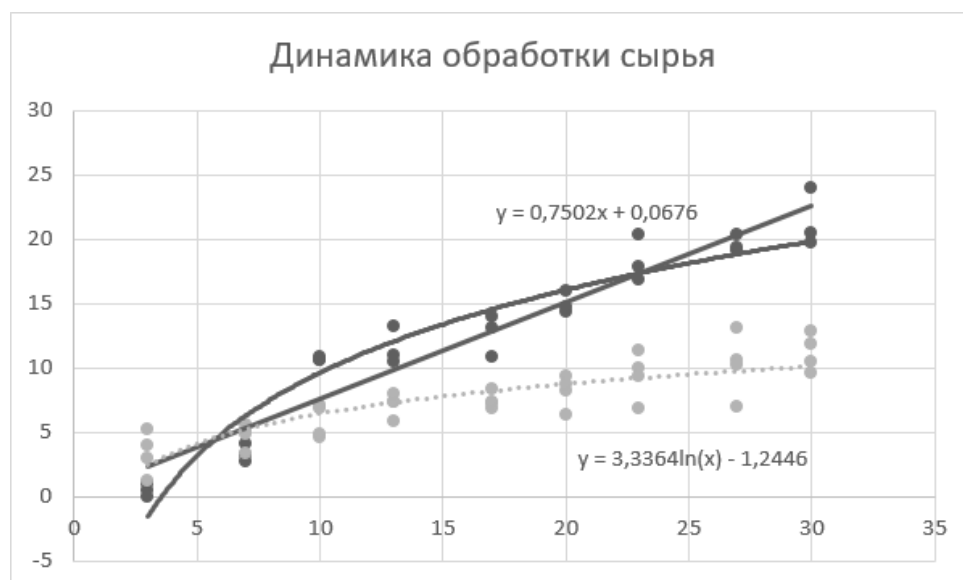


Рис. 11. График парной квадратичной нелинейной регрессии

Определяется относительная ошибка, варьирующаяся в диапазоне 11,25 %. Отклонение является относительно большим, но допустимым для производств, связанным с цветной металлургией. Оптимизация производственной схемы на основе данных моделирования обеспечивает прирост обрабатываемого материала на 11-13 %. Данный подход может применяться на реальном производстве. Дальнейшие исследования в этой области могут рассматривать возможность использования других способов статистического моделирования и интеграцию их в системы имитационного моделирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Организация производства и управление предприятием / О. Г. Туровец, В. Б. Родионов, М. И. Бухалков [и др.]. – М.: ИД «ИНФРА-М», 2007. – 544 с.
2. Павловский, Ю. Н. Имитационное моделирование: учеб. пособие / Ю. Н. Павловский, Н. В. Белотелов, Ю. И. Бродский. – М.: Академия, 2008. – 236 с.
3. Амурский ГК // Полиметалл, 2023. – URL: <https://www.polymetalinternational.com/ru/assets/where-we-operate/amursk-pox-hub/> (дата обращения: 20.06.2022). – Текст: электронный.
4. Черпаков, М. Формирование модели сопровождения несоответствий на промышленном предприятии / М. Черпаков, В. П. Котляров // Актуальные проблемы информационно-телекоммуникационных технологий и математического моделирования в современной науке и промышленности: материалы I Международной научно-практической конференции молодых учёных. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 149-154.



5. Поллак, Г. А. Оптимизация процессов в слабоструктурированной системе методом имитационного моделирования / Г. А. Поллак, А. Г. Палей // Девятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, Екатеринбург, 16-18 октября 2019 г. – Екатеринбург: Издательство Уральского государственного педагогического университета, 2019. – С. 486-491.
6. Гончаров, В. А. Методы оптимизации: учеб. пособие / В. А. Гончаров. – Москва: Юрайт, 2020. – 191 с.
7. Технологии имитационного моделирования в задачах оптимизации технологических процессов / А. Е. Лисовец, А. В. Кириллов, О. В. Попова, Я. Ю. Григорьев // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2022. – С. 383-385.
8. Применение методов машинного обучения в задачах оценки технологических процессов / О. В. Попова, Я. Ю. Григорьев, Е. П. Жарикова, А. Л. Григорьева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII-1 (55). – С. 68-72.
9. Черезов, Н. С. Имитационное моделирование производственных процессов / Н. С. Черезов, А. В. Кириллов, Я. Ю. Григорьев // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2022. – С. 411-413.