

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ МЕДИ: СОЗДАНИЕ ПЛАНИРОВЩИКА
И БИБЛИОТЕКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ МОСТОВЫХ КРАНОВ****А.Л. Морозов, А.А. Малыханов (Ульяновск)**

Компания Амальгама разработала имитационную модель цеха внепечной обработки медного производства ведущего российского производителя цветных металлов. Имитационная модель создавалась для:

- выполнения обоснованной оценки производительности цеха внепечной обработки медного завода;
- проверки эффекта от внедрения предлагаемых организационных изменений;
- проверки возможности увеличения объемов выпуска черновой и анодной меди;
- проверки возможности повышения эффективности использования конвертеров.

Цех внепечной обработки медного производства – объект моделирования с большим количеством взаимосвязей

В имитационной модели рассматриваются следующие агрегаты и единицы оборудования:

Агрегаты:

- плавильные печи Ванюкова, которые работают непрерывно, расплавляя руду и производя жидкий штейн;
- миксеры – по одному у каждой печи Ванюкова – в которых накапливается жидкий штейн после расплавки в печи;
- конвертеры, которые могут работать по одному из трех возможных циклов. На вход принимают жидкий штейн из миксеров, в процессе конвертирования добавляются холодные присадки. В процессе работы конвертеров образуется богатая масса, которая транспортируется в другие конвертеры, и черновая медь, поступающая в анодные печи;
- анодные печи, в которые сливается черновая медь из конвертеров. Работают циклами, после окончания цикла происходит разливка анодной меди.

Элементы транспортной системы:

- мостовые краны, при помощи которых транспортируются ковши и шлаковые чаши;
- места установки ковшей и чаш в пролете;
- ковши для жидкого штейна, черновой меди, жидкого конвертерного шлака и холодных присадок;
- шлаковые чаши для вывоза шлака из конвертеров после завершения цикла конвертирования.

Схематичное расположение агрегатов в моделируемом пролете медного завода показано на рис. 1.

Основной технологический процесс[1] включает перемещение жидкого штейна из печей Ванюкова в конвертеры, затем перемещение черновой меди из конвертеров в анодные печи [1, 2]. В процессе работы конвертеров образуется жидкий конвертерный шлак, который сливается обратно в печи Ванюкова. Конвертеры и анодные печи работают циклами[3]. Каждый из конвертеров может начать работу по одному из трех циклов:

- «полный цикл», который включает подготовку (набор) богатой массы и ее обработку (варку);
- «варка с пустого», при котором пустой конвертер получает уже подготовленную богатую массу для обработки;
- «цикл снабжения», который включает только подготовку богатой массы.

Анодные печи имеют только один возможный цикл работы, включающий плавку и разливку черновой меди.

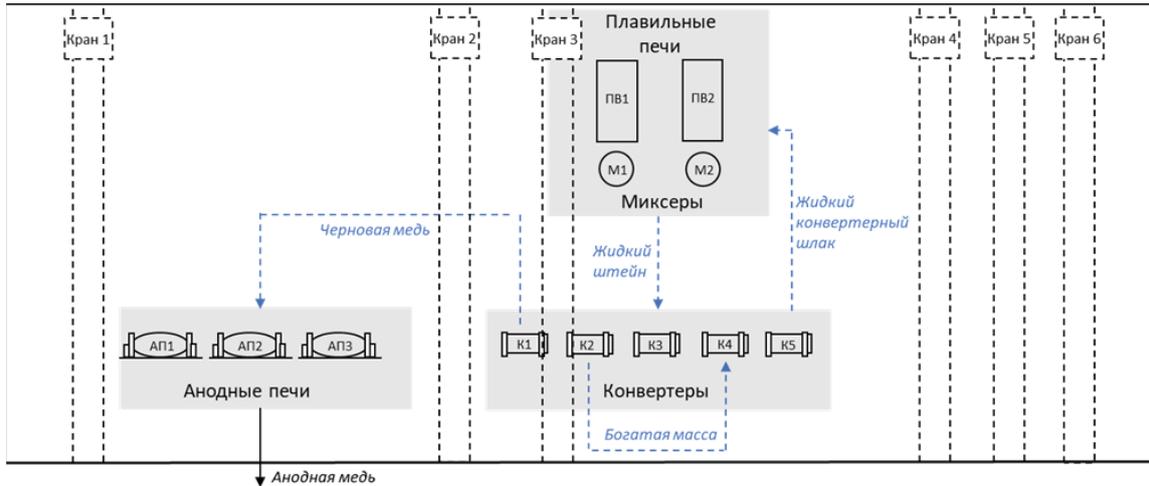


Рис. 1. Основные потоки расплава в примере моделируемого цеха

Адекватное моделирование работы цеха потребовало разработки отдельного модуля планирования

На рис. 2 изображена диаграмма процесса производства меди. Каждый раз после слива штейна из миксера плавильной печи модель должна принять решение, в какой конвертер переместить штейн. В конце цикла снабжения модель должна определить, в какой конвертер слить богатую массу, при этом в цехе должен быть конвертер, готовый принять богатую массу. По завершении полного цикла и цикла варки с пустого образуется богатая масса, и в этот момент также должен иметься конвертер, готовый принять богатую массу. Таким образом, рабочие циклы сильно взаимосвязаны друг с другом.

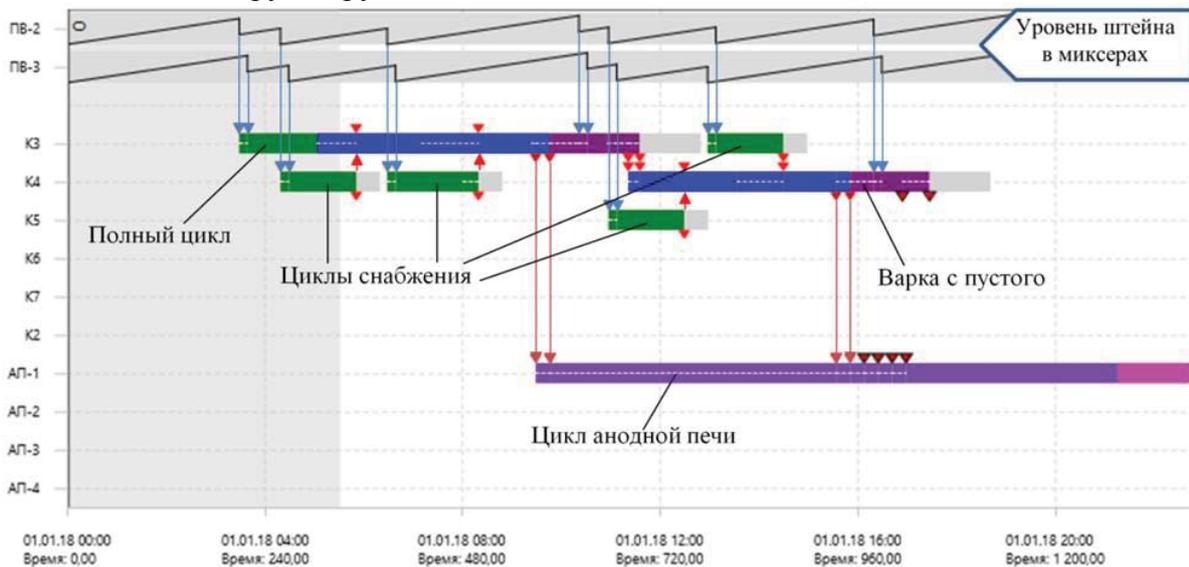


Рис. 2. Взаимосвязь различных циклов оборудования

При попытке создания модели на основе локальных правил модель быстро попадает в состояние блокировки, например, в состояние избытка богатой массы, когда нет конвертеров, готовых принять образовавшуюся после завершения очередного цикла богатую массу. Таким образом, локальных правил оказывается недостаточно для реалистичного моделирования работы цеха – необходим связный план на некоторый горизонт вперед. Для составления такого плана был реализован планировщик работы оборудования.

Алгоритм работы планировщика принимает на вход данные о состоянии цеха на момент начала моделирования и данные о длительностях технологических операций. На выходе алгоритм генерирует расписание работы агрегатов цеха (рис. 3), которое содержит:

- время начала и окончания технологических операций (состояний) конвертеров и анодных печей,
- направления транспортировки штейна, богатой массы и черновой меди с указанием времени, агрегата-источника и агрегата-приемника.

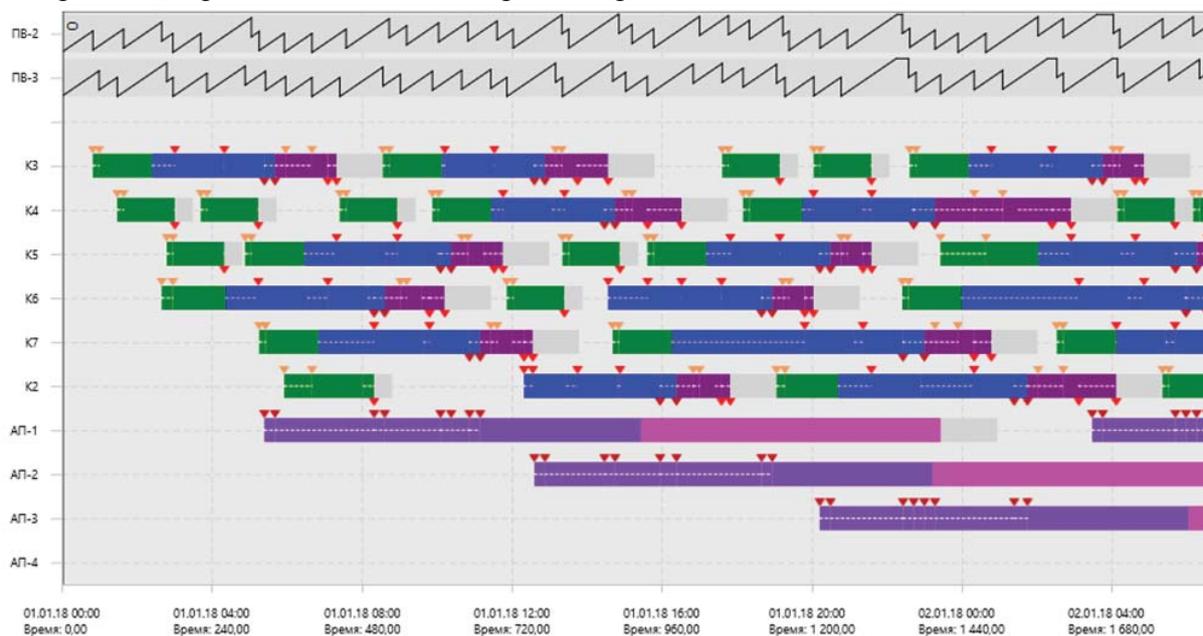


Рис. 3. Пример корректного расписания работы оборудования

В процессе выполнения плана имитационной моделью модель может значительно отстать от плана. Отставание может быть вызвано распределением случайных величин, отсутствием готовых к работе ковшей требуемого типа, а также задержками, вызванными крановыми операциями в периоды высокой нагрузки кранового пролета. При отставании от плана более заданного времени вызывается алгоритм перепланирования, в который передается текущее состояние оборудования в имитационной модели. По результатам перепланирования первоначальный план корректируется с учетом изменившихся условий и накопленного отставания.

Разработанный модуль планирования позволил более точно планировать работу оборудования на предприятии на ближайшую смену, так как при ручном планировании крайне сложно учесть все связи различных циклов оборудования.

Для имитации работы кранов была создана библиотека моделирования крановых операций

Все перемещения расплава между агрегатами производятся в ковшах при помощи мостовых кранов. Крановый пролет состоит из кранов мостового типа, перемещающихся по рельсам. Кран состоит из механизма передвижения крана (движение вдоль кранового пролета), механизма передвижения тележки (движение перпендикулярно крановому пролету) и подъемного механизма. Таким образом, во время работы кран может передвигаться по трём осям. Все краны передвигаются по одним и тем же рельсам кранового пролета, что накладывает ограничение на траектории движения кранов – невозможность пересечения траекторий движения соседних кранов. Координата положения крана на рельсах всегда строго больше положения крана слева и строго меньше координаты положения крана справа от него. Основной технологический процесс требует выполнения следующих крановых операций:

- перемещение ковша со штейном от плавильной печи к конвертеру,
- перемещение ковша с богатой массой от одного конвертера к другому,
- перемещение ковша с черновой медью от конвертера к анодной печи,
- перемещение ковша со шлаком от конвертера к горловине плавильной печи.

Также краны требуются для выполнения вспомогательных операций, таких как перемещение ковшей на шлаковый двор для выбивки шлака, постановка шлаковых чаш под

конвертер или перемещение ковшей с холодными присадками из цеха к конвертерам. Рассмотрим типовую крановую операцию по перемещению расплава между агрегатами. Эта операция включает в себя 4 этапа (рис. 4):

- зацеп пустого ковша краном,
- наполнение ковша расплавом из конвертера,
- слив расплава в анодную печь,
- отцепка пустого ковша в свободной позиции в цехе.

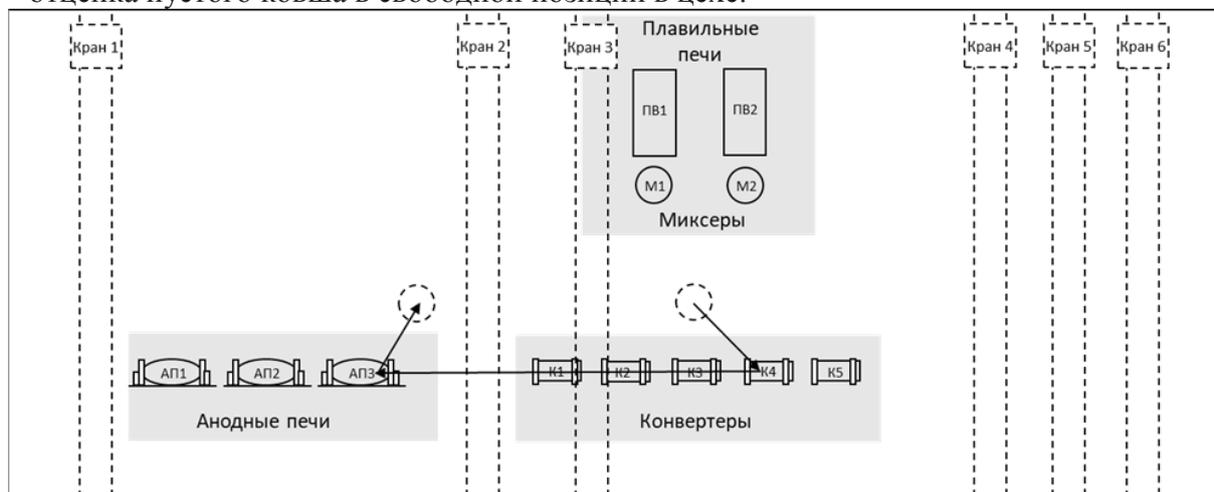


Рис. 4. Пример траектории крановой операции

При независимом моделировании каждого крана крановые операции выполняются крайне неэффективно: краны много времени проводят в состоянии ожидания освобождения нужной позиции соседним краном. Для более рационального использования кранов в модели реализован алгоритм планирования крановых операций. Алгоритм распределяет крановые задачи между кранами и определяет последовательность их выполнения во времени. Алгоритм учитывает следующие ограничения:

- взаимное расположение кранов в пролете;
- скорость движения кранов по осям x , y , z ;
- ограничения на последовательность выполнения операций, например, операция слива шлака всегда должна выполняться перед операцией слива богатой массы;
- минимальное время начала крановой операции;
- плановое время окончания операции;
- порядок посещения позиций при исполнении крановой операции;
- плановое время ожидания в каждой позиции.

Целевой функцией планирования является минимизация суммарного времени просрочки крановых операций. Использование такой функции позволяет, например, отложить выполнение низкоприоритетной вспомогательной задачи постановки пустой шлаковой чаши под конвертер на период низкой загрузки кранового пролета, когда нет риска просрочки операций, обеспечивающих основной технологический процесс.

Плановая траектория движения кранов представляется в виде графика траекторий, где по оси X показано модельное время, а по оси Y – положение кранов в крановом пролете. На рис. 5 показан пример графика запланированных крановых операций для пролета с двумя кранами.

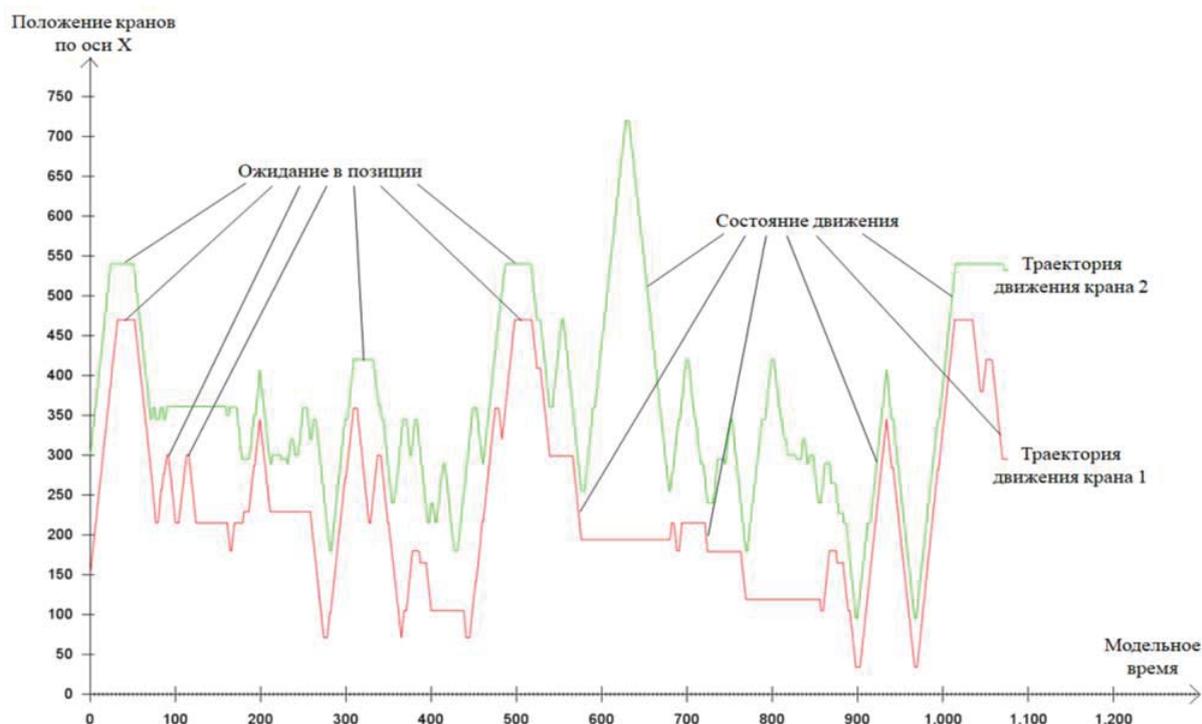


Рис. 5. График запланированных крановых операций

Траектория движения каждого крана представляет собой кусочно-линейную функцию. Кран может находиться в двух состояниях: движение и ожидание в позиции. Крановые операции также представляются в виде кусочно-линейных функций. Задача алгоритма – распределение крановых операций между кранами и расстановка их во времени без пересечений. Алгоритм генерирует все возможные распределения крановых операций между кранами. В процессе перебора отсекаются заведомо неоптимальные перестановки, далее среди всех возможных вариантов выбирается такой, которой обеспечивает наименьшее суммарное время опоздания завершения крановых задач. Для каждого крана достраивается траектория его движения – генерируются траектории подъезда крана к позициям начала выполнения крановых задач, а также вынужденные движения кранов для обеспечения передвижения соседних кранов. Перепланирование траектории движения кранов вызывается каждый раз, когда добавляется новая крановая задача или когда время нахождения крана в позиции превышает плановое время нахождения крана в позиции.

Результатом работы над моделированием крановых операций на медном производстве стало вынесение алгоритма планирования крановых операций в отдельную библиотеку для возможности её повторного использования в других проектах, требующих моделирования крановых пролетов. В будущем в библиотеку планирования крановых операций планируется добавить возможность задания приоритетов крановым операциям и задание периодов недоступности кранов.

Модель помогает принимать решения при оперативном и среднесрочном планировании

Разработанная модель позволяет оценить производительность цеха внепечной обработки медного производства. Пример анализа производительности цеха в зависимости от интенсивности работы печей и количества работающих конвертеров показан на рис. 6.

		Скорость наполнения миксеров, т/час								
		35	40	45	50	55	60	65	70	75
Кол-во работающих конвертеров	3	ЧМ 18 (828) БМ 19 (874) Изб.шт. 0% Варок 9 Ожид. конв. 25% Загр. конв. 61%	ЧМ 18 (828) БМ 19 (874) Изб.шт. 10% Варок 9 Ожид. конв. 26% Загр. конв. 63%	ЧМ 18 (828) БМ 19 (874) Изб.шт. 18% Варок 9 Ожид. конв. 26% Загр. конв. 64%	ЧМ 18 (828) БМ 18 (828) Изб.шт. 22% Варок 9 Ожид. конв. 27% Загр. конв. 62%	ЧМ 18 (828) БМ 18 (828) Изб.шт. 26% Варок 9 Ожид. конв. 27% Загр. конв. 62%	ЧМ 18 (828) БМ 18 (828) Изб.шт. 29% Варок 9 Ожид. конв. 27% Загр. конв. 62%	ЧМ 18 (828) БМ 18 (828) Изб.шт. 31% Варок 9 Ожид. конв. 27% Загр. конв. 63%	ЧМ 18 (828) БМ 18 (828) Изб.шт. 33% Варок 9 Ожид. конв. 27% Загр. конв. 63%	ЧМ 18 (828) БМ 18 (828) Изб.шт. 34% Варок 9 Ожид. конв. 27% Загр. конв. 63%
	4	ЧМ 18 (828) БМ 19 (874) Изб.шт. 0% Варок 9 Ожид. конв. 25% Загр. конв. 45%	ЧМ 22 (1012) БМ 31 (1426) Изб.шт. 0% Варок 10 Ожид. конв. 33% Загр. конв. 65%	ЧМ 24 (1104) БМ 36 (1656) Изб.шт. 0% Варок 12 Ожид. конв. 28% Загр. конв. 68%	ЧМ 26 (1196) БМ 39 (1794) Изб.шт. 0% Варок 13 Ожид. конв. 21% Загр. конв. 70%	ЧМ 28 (1288) БМ 37 (1702) Изб.шт. 0% Варок 14 Ожид. конв. 19% Загр. конв. 71%	ЧМ 30 (1380) БМ 40 (1840) Изб.шт. 0% Варок 15 Ожид. конв. 12% Загр. конв. 70%	ЧМ 26 (1196) БМ 37 (1702) Изб.шт. 20% Варок 12 Ожид. конв. 23% Загр. конв. 68%	ЧМ 24 (1104) БМ 37 (1702) Изб.шт. 22% Варок 12 Ожид. конв. 23% Загр. конв. 68%	ЧМ 24 (1104) БМ 37 (1702) Изб.шт. 25% Варок 12 Ожид. конв. 22% Загр. конв. 68%
	5	ЧМ 18 (828) БМ 19 (874) Изб.шт. 0% Варок 9 Ожид. конв. 25% Загр. конв. 37%	ЧМ 22 (1012) БМ 31 (1426) Изб.шт. 0% Варок 10 Ожид. конв. 34% Загр. конв. 62%	ЧМ 24 (1104) БМ 36 (1656) Изб.шт. 0% Варок 12 Ожид. конв. 28% Загр. конв. 64%	ЧМ 26 (1196) БМ 39 (1794) Изб.шт. 0% Варок 13 Ожид. конв. 21% Загр. конв. 66%	ЧМ 28 (1288) БМ 37 (1702) Изб.шт. 0% Варок 14 Ожид. конв. 25% Загр. конв. 62%	ЧМ 30 (1380) БМ 40 (1840) Изб.шт. 0% Варок 15 Ожид. конв. 11% Загр. конв. 58%	ЧМ 34 (1564) БМ 44 (2024) Изб.шт. 0% Варок 17 Ожид. конв. 19% Загр. конв. 66%	ЧМ 36 (1656) БМ 40 (1840) Изб.шт. 0% Варок 18 Ожид. конв. 22% Загр. конв. 69%	ЧМ - БМ - Изб.шт. - Варок - Ожид. конв. - Загр. конв. -

Рис. 6. Анализ производительности цеха с помощью модели

Так, в приведенном условном примере цех с тремя работающими конвертерами может работать со скоростью наполнения миксеров плавильных печей штейном не более 35 тонн в час, использование 4 конвертеров позволяет переработать до 60 тонн штейна в час, использование 5 конвертеров – до 70 тонн штейна в час.

Выводы

Моделирование работы цеха потребовало реализации модуля планирования, который используется как самостоятельно, так и в логике имитационной модели. Имитационная модель обращается к модулю планирования для актуализации плана выполнения операций по производству меди. На разработку и верификацию модуля планирования пришлось около половины всех трудозатрат проекта.

Отдельной решенной задачей стало моделирование одновременной работы до 6 мостовых кранов в пролете цеха. Удачная декомпозиция предметной области позволила создать универсальную библиотеку моделирования крановых пролетов.

Литература

1. Воскобойников В.Г. и др. Общая металлургия - 6-изд., перераб. и доп. - М.: ИКЦ «Академкнига», 2005 - 768 с.
2. Производство меди. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. М.: Бюро НДТ, 2015 – 344 с.
3. Вершинина, Е. П. Металлургия тяжелых цветных металлов [Электронный ресурс]: лаб. практикум / Е. П. Вершинина, Н. В. Марченко, Э. М. Гильдебрандт. – Электрон. издан. (3 Мб). – Красноярск : ИПК СФУ, 2009