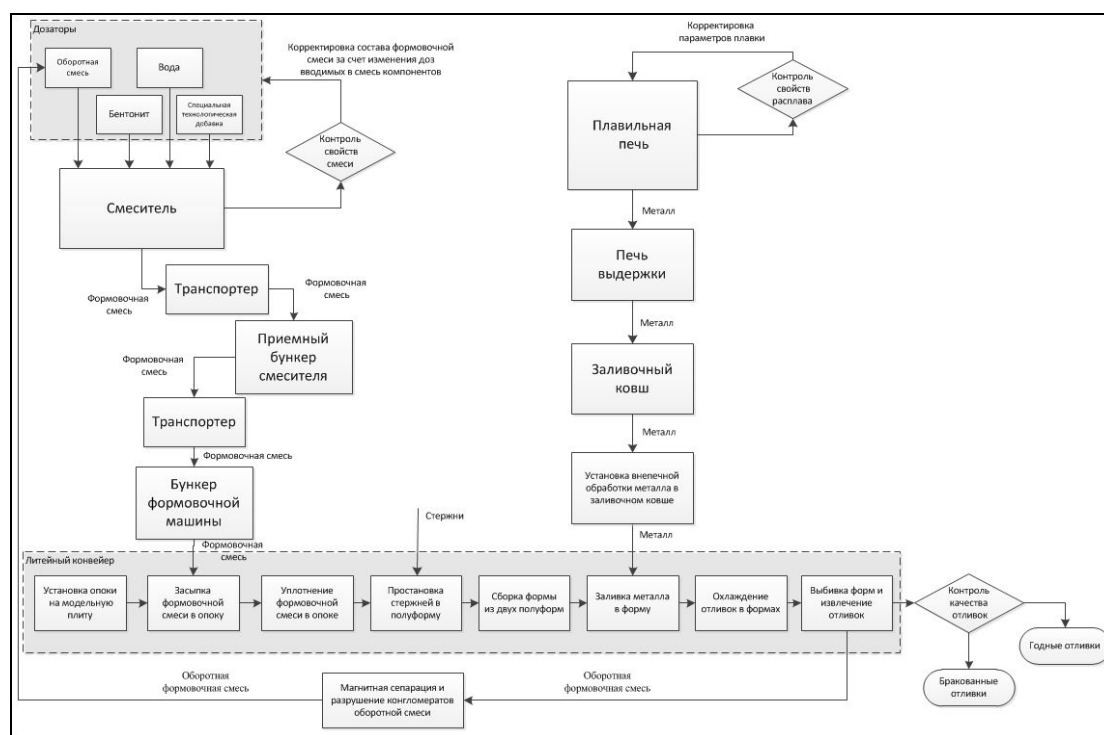


## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК В РАЗОВЫХ ПЕСЧАНО-БЕНТОНИТОВЫХ ФОРМАХ

М.В. Зенькович, В.В. Золотарев, В.С. Иноземцева, Т.В. Воронцова,  
Ю.Г. Дреус (Москва)

Технологический процесс изготовления отливок в разовых песчано-бентонитовых формах в настоящее время является наиболее распространенным способом производства литых деталей и заготовок. Этим способом изготавливается до 65–80% всех производимых в мире отливок, и такое состояние, по оценкам отечественных и зарубежных специалистов, сохранится также и в будущем, несмотря на совершенствование и развитие производства отливок в металлических формах, по выплавляемым моделям, в оболочковых формах из терморепротивных смесей, непрерывным литьем и другими специальными способами. Схема технологического процесса представлена на рис. 1 [1].



**Рис. 1. Схема технологического процесса изготовления отливок  
в разовых песчано-бентонитовых формах**

Интенсификация производства, связанная с использованием современных высокопроизводительных формовочных линий, а также частая смена номенклатуры изготавливаемых отливок, повышение металлоемкости форм и поступление в формовочную смесь большого количества выгоревшей стержневой смеси приводят к возникновению целого ряда технологических проблем, решение которых представляет большие трудности даже при использовании современных средств контроля и управления. Поэтому значительными остаются потери предприятий от литейного брака. Для минимизации влияния этих негативных факторов необходимо принимать ряд мер еще на стадии проектирования производств, например: по возможности предусматривать специальные средства для удаления остатков

стержней в отвал, использовать стратегию «усреднения» оборотной смеси и т.п. Для повышения качества проектных решений, обеспечивающих синхронизацию взаимодействия основных и вспомогательных служб литейного предприятия, в современной зарубежной и отечественной практике при проведении технического перевооружения широко применяется такой метод исследования сложных систем, как имитационное моделирование.

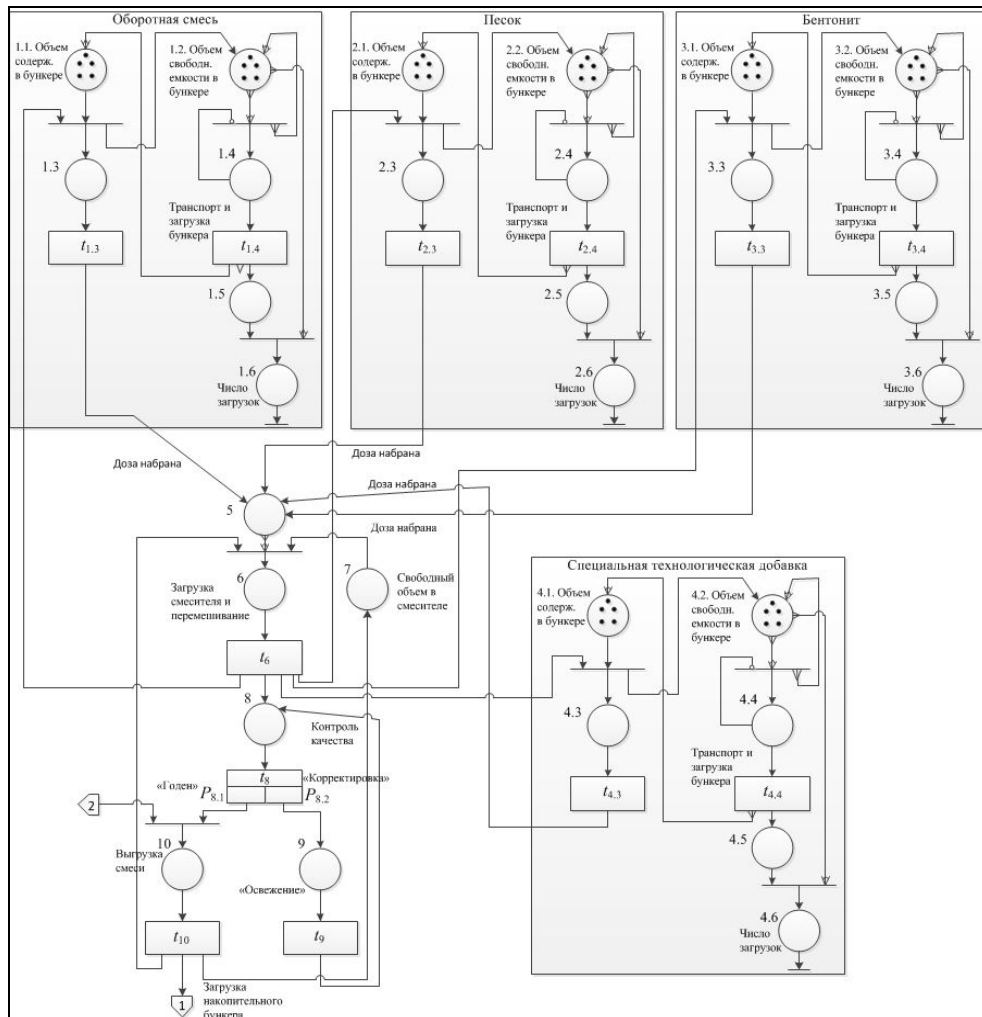
В настоящей работе для формализованного описания процесса используется аппарат сетей Петри, а для программной реализации имитационной модели – система моделирования *GPSS World* [2]. Изложенный в данной работе подход к построению имитационных моделей производств отливок в разовых песчано-бентонитовых формах является альтернативным подходу, изложенному в работе [3]. Так, в этой работе для формализованного описания процесса используется теория агрегативных систем, а для программной реализации имитационной модели – объектно-ориентированный язык программирования C++.

### Формализованное описание технологического процесса

Модель исследуемого технологического процесса представлена в виде четырех основных взаимодействующих процессов, которые включают в себя как строго последовательные цепочки определенных действий (фазы), так и одновременно (возможно, асинхронно) выполняющиеся действия. Взаимодействия между процессами, фазами и отдельными действиями осуществляются через обращения к общим ресурсам или по управлению на основе проверки каких-либо логических условий. Этим четырем основным процессам даны следующие условные названия: «Приготовление формовочной смеси», «Изготовление форм», «Заливка форм», «Выбивка форм». Отсутствие в названиях некоторых других действий (например, «охлаждение форм» и др.) не говорит об их отсутствии в модели: они включены в модель в виде подпроцессов или фаз процессов.

В качестве примера приводится формализованное описание процесса «Приготовление формовочной смеси». Фрагмент Сети Петри, описывающий данный процесс, приведен на рис. 2. В смеситель из дозаторов (емкостей фиксированных объемов, обеспечивающих правильную пропорцию загружаемых материалов для получения формовочной смеси требуемого состава), загружаются обратная формовочная смесь, кварцевый песок, бентонит, специальная технологическая добавка, и заливается вода. Это действие осуществляется, если формовочная смесь предыдущего замеса выгружена из смесителя и при наличии необходимых материалов для загрузки в смеситель (в модели эта часть процесса представлена с помощью взаимодействующих позиций 5, 6 и 7, а также времени загрузки  $t_6$ ). Для успешного выполнения указанных действий должны быть предварительно заполнены дозаторы компонентов формовочной смеси, расположенные над смесителем (позиции 1.3, 2.3, 3.3 и 4.3, времена на загрузку  $t_{1.3}$ ,  $t_{2.3}$ ,  $t_{3.3}$  и  $t_{4.3}$ ). Здесь первая цифра в номерах обозначает тип загружаемого материала, а вторая – порядковый номер позиции в сети Петри. Указанные емкости заполняются из бункеров (позиции 1.1, 2.1, 3.1 и 4.1). При понижении в бункерах уровня материала ниже допустимого формируются заявки на доставку этого материала со склада и его загрузку в бункер. Контроль уровней в модели ведется по объему свободного места в бункерах (позиции 1.2, 2.2, 3.2 и 4.2). Запросы на доставку, реализация доставки и загрузки, а также подсчет числа доставок-загрузок материалов в модели представляется взаимодействием позиций 1.4, 1.5, 1.6, 2.4, 2.5, 2.6, 3.4, 3.5, 3.6, 4.4, 4.5, 4.6 и временными затратами  $t_{1.4}$ ,  $t_{2.4}$ ,  $t_{3.4}$  и  $t_{4.4}$ . Загрузка в смеситель и перемешивание смеси отображаются взаимодействием позиций 6 и 7 ( $t_6$  – время). После загрузки и перемешивания осуществляется отбор пробы для контроля качества смеси (позиция 8, время  $t_8$ ). Маркер в позицию 9 приходит при необходимости корректировки состава формовочной смеси за счет дополнительной дозировки вводимых в смесь компонентов

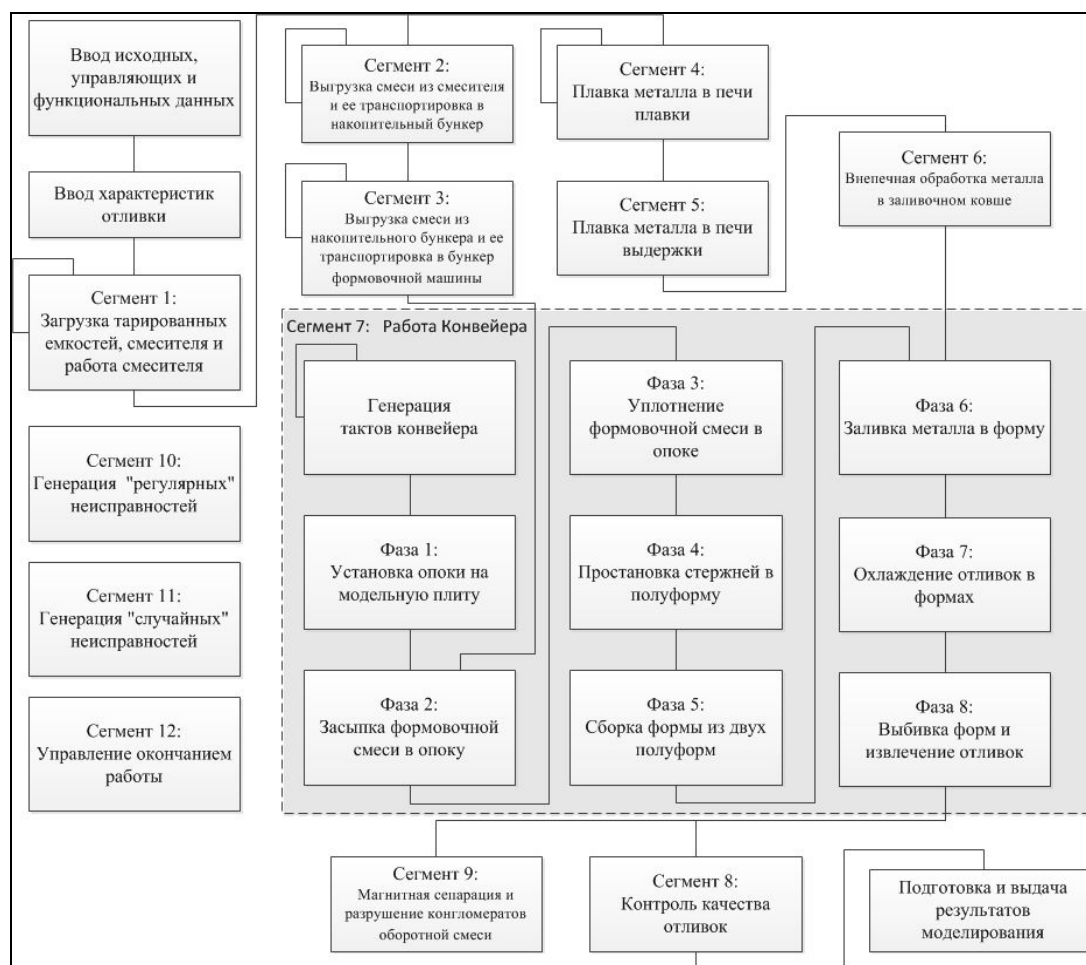
(время на корректировку  $t_9$ ). В переходе, стоящем за позицией 8, осуществляется один из альтернативных выходов, в зависимости от качества смеси. Задавая значения вероятностей  $P_{8,1}$  и  $P_{8,2}$ , можно управлять направлением продвижения маркеров при срабатывании перехода, анализируя влияние качества смеси и инерционности контроля на весь технологический процесс или на его части [2].



**Рис. 2. Фрагмент Сети Петри, описывающий процесс «Приготовление формовочной смеси»**

### Описание имитационной модели

Формализованная модель в виде сети Петри описывает только поведение системы и не позволяет получить числовые характеристики, отражающие состояния системы [4]. Для получения этих характеристик на базе формализованной модели в виде сети Петри была разработана имитационная модель исследуемого технологического процесса. Для разработки имитационной модели была выбрана специализированная система имитационного моделирования *GPSS World*. Функциональная организация имитационной модели, представленная на рис. 3, отображает структурную организацию модели и взаимодействие программных модулей, происходящее в процессе работы модели [2].



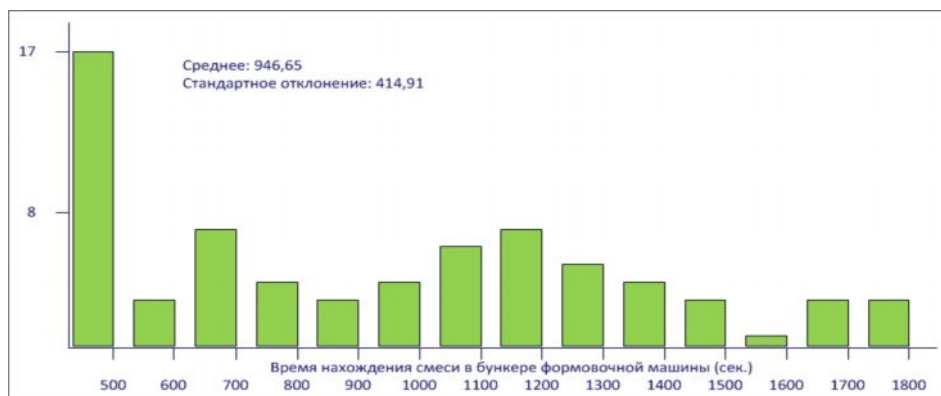
**Рис. 3. Функциональная организация имитационной модели**

Для проверки правильности работы модели было разработано и реализовано более 30 тестовых задач (экспериментов). В качестве примера приводится описание целей некоторых из них:

- определение максимальной производительности. Окончание моделирования – по заданной длительности работы исследуемой производственной системы;
- аналогичная цель, но при изменении такта конвейера;
- аналогичная цель, но при останове по заданному количеству изготовленных годных отливок;
- оценка производительности, задержек и потерь при «регулярных» (детерминированных) отказах;
- оценка производительности, задержек и потерь при «случайных» отказах;
- оценка тех же характеристик, но при изменении номенклатуры изготавливаемых отливок (и их характеристик);
- оценка характеристик функционирования объекта при изменении такта конвейера и типов отказов;
- оценка характеристик функционирования исследуемой производственной системы при изменении времен устранения неисправностей.

Исходные данные вводятся в модель в виде десятичных целых констант и в виде функций, задаваемых своим дискретным представлением, т.е. парами чисел для каждой заданной точки с линейной интерполяцией для промежуточных значений.

Результаты работы модели выдаются в графическом и текстовом представлениях и могут просматриваться как после окончания работы модели, так и при прерывании (приостановке) ее работы. В качестве примера результатов моделирования приводится гистограмма распределения времени нахождения смеси в бункере формовочной машины (рис. 4).



**Рис. 4. Распределение времени нахождения смеси в бункере формовочной машины**

### Выводы

В докладе рассмотрена методика разработки имитационных моделей производств отливок в разовых песчано-бентонитовых формах. Представлено формализованное описание производственной системы в виде сети Петри. На основе формализованного описания создана имитационная модель. Имитационная модель реализована в среде *GPSS World*. Модель позволяет, изменяя параметры, описывающие характеристики процесса и ресурсы производственной системы, оценивать их влияние на технологический процесс в целом и на его отдельные показатели (производительность, технологические потери, величины простоев оборудования и др.), проводить сравнительный анализ альтернативных конфигураций производственной системы, а также выявлять «узкие» места процесса. Представленная методика успешно применяется при выполнении проектных и инженеринговых работ по созданию новых и реконструкции существующих производств отливок в разовых песчано-бентонитовых формах, а также при разработке информационно-управляющих систем для этих производств.

### Литература

1. Штольцель К. Технологические процессы литейного производства. Теоретические и практические основы. – М: Машиностроение, 1975.
2. Зенькович М.В., Золотарев В.В., Иноземцева В.С., Воронцова Т.В., Дреус Ю.Г. Имитационная модель производства отливок в разовых песчано-бентонитовых формах // Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2013. Аннотации докладов в 3 томах. Т.2. Проблемы фундаментальной науки. Стратегические информационные технологии. – М.: НИЯУ МИФИ, 2013.
3. Зенькович М.В., Дреус Ю.Г. Методы и средства поддержки принятия решений при проектировании формовочных линий // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 11.
4. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. – М.: Мир. 1984.