

## ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

УДК 621.397:69

*ЛИНГУАНГ СОНГ (LINGGUANG SONG),*

*lsong5@uh.edu*

*Хьюстонский университет, 375 Технический корпус,*

*каф. управления строительством,*

*США, Техас 77204-4020, Хьюстон*

*НЕЙЛ Н. ЭЛДИН (NEIL N. ELDIN),*

*neldin@uh.edu*

*Хьюстонский университет, 110G Технический корпус,*

*каф. управления строительством,*

*США, Техас 77204-4020, Хьюстон*

### **АДАПТИВНОЕ СЛЕЖЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ТРУДОЕМКИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ ДЛЯ УПРЕЖДАЮЩЕГО ПЛАНИРОВАНИЯ\***

В статье предложено адаптивное слежение и моделирование в режиме реального времени трудоемких строительных работ для упреждающего планирования. Предложенный метод заключается в постоянном фиксировании информации о строительных работах с помощью датчиков слежения, которая затем подается в имитационную модель для ее автоматического обновления. Такая адаптационная возможность позволяет постоянно корректировать заданную имитационную модель с целью отображения изменений в среде проекта для составления более точного графика упреждающего планирования. По сравнению с традиционным автономным моделированием, которое использует

---

\* Статья переведена и опубликована в «Вестнике ТГАСУ» согласно Лицензионному соглашению с издательством Elsevier от 24 марта 2013 г. № 3115671094877.

Представленная статья рассматривает актуальные проблемы имитационного моделирования процессов при производстве трудоемких строительных работ в полевых условиях в целях оперативного (упреждающего) планирования на примере дорожного строительства. Поиску решения данной проблемы в отечественных научных исследованиях уделяется недостаточно внимания. Авторы статьи Lingguang Song и Neil N. Eldin из Хьюстонского университета предлагают решение данной проблемы в условиях Соединённых Штатов Америки на примере конкретных строительных объектов с учётом уровня развития информационных технологий и технологического уровня дорожно-строительной отрасли, природно-климатических особенностей и т. д. В связи с этим адаптация предлагаемых моделей и алгоритмов для условий России представляется научной задачей, требующей отдельных исследований.

© 2012 Издательство Elsevier B.V. Авторские права защищены

© Лингуанг Сонг (Lingguang Song), Нейл Н. Элдин (Neil N. Eldin), 2013

© Перевод на русский язык, оформление. ТГАСУ, 2013

© Издание, распространение на территории РФ. ТГАСУ, 2013

стационарные входящие потоки, способность предложенного моделирования в реальном времени к динамичному объединению новых данных проекта и адаптации к изменениям в полевых работах может повысить точность упреждающего планирования проекта. В работе представлены пилотная система и конкретные ситуации с целью доказательства осуществимости предложенной концепции.

**Ключевые слова:** в реальном времени; моделирование; слежение; строительные работы; упреждающее планирование.

### Введение

Такие трудоемкие строительные работы, как дорожные, являются процессом с весьма интенсивным использованием оборудования, который простирается на многие километры и находится под влиянием множества препятствий и неопределенностей внешней среды. Он требует тщательной разработки проекта организации строительства (ПОС) и контроля за сокращением графика и финансовых рисков в отношении подрядчика [1]. Разработка ПОС в настоящее время включает не только основное планирование на стадии подготовительных строительных работ, но и тщательный мониторинг и систематическое упреждающее планирование на стадии полевых работ. В то время как основное планирование обеспечивает глобальный вид всех стадий проекта и общую стратегию реализации, упреждающее планирование, или так называемое краткосрочное, – это наиболее подробный план, включающий перечень необходимых работ, проводимых в относительно короткий временной интервал, построенный с учетом самых современных специфических полевых условий и характеристик [2]. При сложной и неопределенной природе строительных полевых работ, эффективное упреждающее планирование, способное к динамической перепланировке согласно реальным условиям проекта, становится чрезвычайно важным.

Отраслевой обзор показал, что упреждающее планирование чаще всего представляется в виде столбиковых диаграмм, охватывающих период в две, три или четыре недели [Там же]. Планировщики полагаются на легкодоступную проектную информацию и на собственные субъективные мнения в оценке неопределенности и прогноза хода выполнения работ. Многие ученые [3] отметили недостатки столбиковой диаграммы и метода критического пути при изображении повторной активности, различных видов ограничений, факторов, влияющих на производительность, а также неопределенности внешней среды. Эти недостатки побудили ученых применить дискретное моделирование для лучшего представления строительных работ с целью планирования.

Дискретное моделирование может представлять работу динамической и, такой неопределенной системы, как строительные работы, в качестве хронологической последовательности событий в компьютерной модели. Эксперименты с имитационной моделью позволяют пользователям лучше понять поведение системы, оценить влияние различных ограничений и факторов, определить «узкие места», распределить ресурсы, справиться с рисками и, в конечном счете, улучшить работу системы. Моделирование может применяться в планировании и оптимизации различных видов строительных работ, таких как сооружение высотных зданий, земляные работы, проходка тоннеля, проводка канализационных труб и укладка дорожного покрытия [3, 4].

Тем не менее, моделирование изначально применялось для долгосрочного планирования (например, основного планирования или оптимизации стройгенплана) на подготовительном этапе, когда имитационная модель разрабатывается с целью прогнозирования долгосрочного, устойчивого поведения системы. Процесс моделирования обычно предполагает, что специализированная система неподвижна и что модели будут работать при заданном наборе таких параметров системного проектирования как, например, последовательность действий и распределение времени [5]. Напротив, целью упреждающего планирования является не вычисление средней величины случайностей в поведении системы, а учет и реагирование на изменения системы в режиме реального или близкого к реальному времени. Это требует от имитационной модели способности постоянно улавливать изменения в полевых работах и проводить соответствующую коррекцию с целью своевременной оценки и влияния изменений. Сюда относятся и несколько уникальных задач при использовании моделирования в качестве инструмента упреждающего планирования.

Во-первых, данные, описывающие самый последний ход выполнения работ, являются основой для упреждающего проектирования, но объем времени и затрат, необходимый для ручного сбора и анализа данных в короткие сроки, может быть недопустимым.

Во-вторых, поскольку пересмотр сроков выполнения работ необходим всякий раз, когда происходят существенные изменения в статусе проекта, частая ручная коррекция может быть затруднена в свете неизбежных и постоянных перемен в среде проекта в соответствии с графиком выполнения работ. Такие частые процедуры ручного сбора данных и корректировки модели неизбежно повысят стоимость традиционного имитационного моделирования и затруднят промышленное применение.

Следовательно, для того чтобы сделать моделирование полезным для упреждающего планирования, методы имитационного моделирования должны быть усовершенствованы до автоматизированного и простого процесса. Авторы надеются, что отслеживание оперативных данных в режиме реального времени явится катализатором, необходимым для изменения текущего процесса имитационного моделирования в пользу упреждающего планирования. При современном развитии датчиков слежения (например, локационные датчики, датчики перемещения, изображения) со строительного участка может быть записан и собран большой объем информации с целью проведения удаленной и автоматизированной обработки и анализа данных. Эти данные содержат информацию о текущей деятельности, которая анализируется с целью изменения режимов работы и неопределенностей при упреждающем планировании. Такая информация может использоваться и для управления реальным временем и более автоматизированным процессом корректировки модели, который может существенно уменьшить нагрузку на инженеров при обслуживании имитационной модели.

Данная работа предлагает каркас приложений для адаптивного слежения и моделирования в режиме реального времени трудоемких строительных работ, предназначенный для упреждающего планирования. В статье описан

новый процесс моделирования и показана его осуществимость посредством пилотной системы и конкретных производственных ситуаций. В следующем разделе представлен обзор соответствующей литературы, касающейся отслеживания и моделирования в реальном времени, а затем определен новый имитационный принцип, после которого представлена пилотная система и конкретные ситуации.

### 1. Обзор литературы

Было опубликовано несколько работ [6], описывающих недостатки существующего имитационного принципа и потребности в среде моделирования в реальном времени. Для улучшения контроля динамических систем моделирование непрерывно интегрировалось с другими обеспечивающими технологиями для проведения анализа данных, поступающих в реальном времени. Моделирование в реальном времени, или в режиме онлайн, расширяет общепринятое моделирование в режиме офлайн для обеспечения онлайн планирования и возможностей управления [5]. Например, данные, полученные в реальном времени от систем мониторинга производственного цеха, использовались для ручной коррекции имитационных моделей и принятия решений [7]. Программирование динамическим потоком данных (DDDAS) – это новая парадигма, в которой моделирование, измерение и применение динамически объединены [8]. Эта концепция предполагает, что моделирование непрерывно ведет сбор данных из реальных ситуаций и использует их для настройки самой модели и прогноза будущих состояний системы. Такая динамическая система обратной связи повысит качество имитационной модели в рабочем цикле и осуществит дальнейший сбор данных. Однако в настоящее время эта концепция имеет очень ограниченное практическое применение, и необходимы исследования в области разработки и реализации системной архитектуры.

В строительной отрасли тоже признана возможность контроля планирования в реальном времени с использованием потоковой передачи многочисленных данных с рабочих участков, которые становятся доступными благодаря современным сенсорным и техническим средствам связи [9]. Однако работа в области интегрирования сбора данных в реальном времени и моделирования с целью более эффективного упреждающего планирования в полевых условиях очень ограничена. Были разработаны алгоритмы применения проектных данных, полученных в реальном времени для оценки продвижения проекта, его продуктивности и фактических материальных затрат [10]. Применение концепции моделирования в реальном времени в строительстве довольно ограничено. Chung, Mohamed и AbouRizk вручную проводили сбор данных проекта тоннеля каждые две недели и использовали эти данные для усовершенствования имитационных моделей входа путем байесовского метода обновления данных [11]. Их исследования показали, что повторяющиеся долгосрочные проекты дают возможность отрегулировать входные параметры моделирования на основе фактического выполнения проекта. Lu, Dai и Chen разработали систему поддержки принятия решений для планирования

эксплуатации бетонного завода [12]. Эта система отслеживает продолжительность работы в реальном времени, а позже использует данные для обновления имитационных моделей входа.

Таким образом, опубликованные исследования сосредоточены, в основном, на новом применении оперативных данных для моделирования продолжительности работы. Применение оперативных данных также дает новые возможности преобразования других компонентов имитационного моделирования, таких как моделирование входных данных, обоснование модели и обновление. Кроме того, поскольку упреждающее планирование на основе моделирования является относительно новой областью исследования, существует потребность в определении систематического подхода к преобразованию и объединению различных компонентов моделирования. В следующем разделе дано определение системных компонентов предложенного каркаса для адаптивного слежения и моделирования в реальном времени, а также на концептуальном уровне объясняется его способность преобразовывать существующий процесс моделирования упреждающего планирования.

## 2. Каркас для адаптивного слежения и моделирования в реальном времени

Предложенный каркас для адаптивного моделирования в реальном времени содержит 4 компонента, а именно: получение данных в реальном времени, базу знаний процессов, адаптивное моделирование и службы дискретного моделирования (рис. 1)

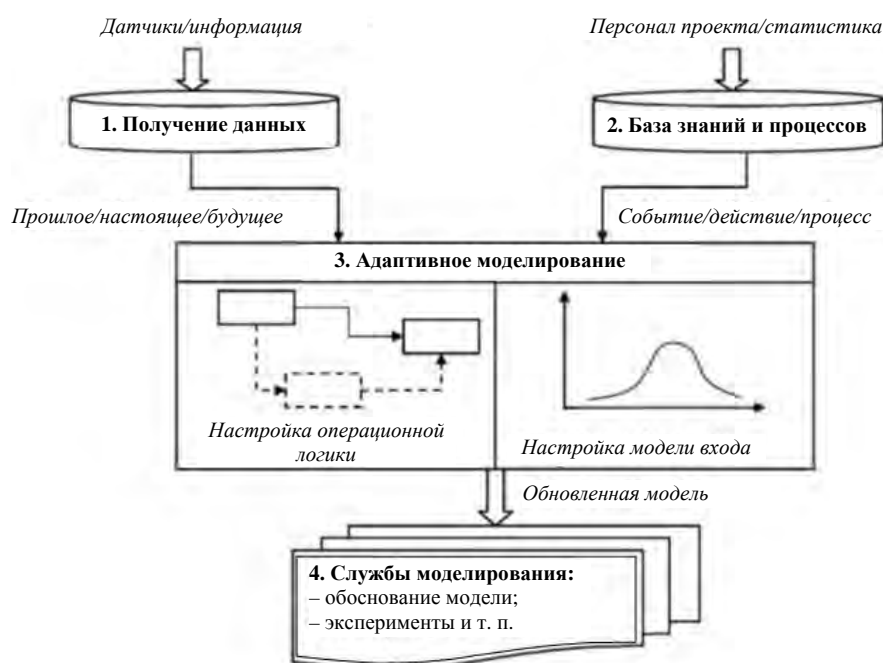


Рис. 1. Каркас для адаптивного слежения и моделирования в реальном времени

Эти компоненты объединяют данные, полученные в реальном времени, с базой знаний процессов для ускорения обновления и корректировки постоянной модели для отображения изменений на строительных площадках с целью упреждающего планирования. В разд. 3 показано, как эта концептуальная база внедряется в пилотную систему для моделирования транспортировки асфальта и укладки дорожного покрытия.

### **2.1. Получение данных в режиме реального времени**

Моделирование в реальном времени – это процесс моделирования потоком данных. Для безошибочного представления и прогноза работы системы необходим существенный объем данных для выявления текущего статуса проекта и настройки структуры операционной логики модели (например, определение и последовательность событий) и модели входа (например, распределение продолжительности работы). Предлагаемый компонент сбора данных постоянно собирает данные, которые дают соответствующее описание текущего статуса проекта и таких перспектив полевых работ, как производительность, текущее выполнение проекта и распределение ресурсов в ближайшем будущем. Эти данные можно собрать из разных источников, таких как устройства для сбора данных, информационные системы и базы данных, а также персонал проекта.

Сбор оперативных и плановых данных должен осуществляться постоянно для отражения изменений в ходе выполнения работ на строительном участке. Однако сбор данных в реальном времени может быть проблематичным. Объем времени и затрат, необходимый для ручного сбора и обработки этих данных, недопустим. Тем не менее, с появлением современных сенсорных и технических средств связи наряду с уже широко применяемыми приложениями информационных систем и баз данных, нехватка данных, поступающих в реальном времени, теряет свою важность при разработке и реализации моделирования в реальном времени.

В настоящее время экономически доступно множество встроенных сенсорных датчиков, датчиков широкого спектра применения, а также спутниковых (например, локационные датчики, датчики скорости, перемещения, изображения) для беспроводного, автоматического или удаленного сбора данных. Например, в проектах трудоемких строительных работ с напряженным использованием оборудования применяется глобальная система определения местоположения (GPS) строительного оборудования, такого как землеройные машины [10, 13] и грузовики для транспортировки бетона [12]. GPS также используется в пилотной системе настоящей работы.

В дополнение к данным, полученным в реальном времени, упреждающее планирование требует входные данные рабочих параметров будущего проекта, которые могут существенно повлиять на ход выполнения работ. Управляемые рабочие параметры, такие как распределение будущих ресурсов и изменение расположения, могут быть собраны планировщиками и зафиксированы компьютеризированными системами планирования производства или корпоративными информационными системами. Концепция электронного обмена данными (EDI) или, лучше сказать, метод интероперабельности, мо-

жет обеспечить бесшовную интеграцию этих информационных систем с платформой моделирования в реальном времени [14]. Более того, нерегулируемые операционные переменные, такие как грядущая погода или движение транспорта, если они необходимы для имитационного моделирования, могут быть взяты из внешних источников информации.

## **2.2. База знаний процессов**

Как только данные собраны со строительных площадок, оборудованных высокочувствительными устройствами, и стали доступны, следующим логическим шагом будет анализ и интерпретация последовательно полученных данных для имитационного моделирования. Многие датчики, такие как GPS, могут записывать и передавать информацию с частотой в несколько минут или даже секунд. Такой высокочастотный процесс сбора данных не только повышает их точность, но и генерирует значительный объем информации, что оспаривает существующие способы своевременного извлечения информации. Так как полная автоматизация процесса извлечения информации не является реалистичной, существует возможность модернизации и полуавтоматизации процесса путем объединения знаний конкретной области реальной деятельности, такой как определение взаимосвязей операций и моделирование входных данных, в каркас для минимизации прямого участия пользователя. В предложенной базе данных процессов знания 1) об операционной логике и 2) о моделировании входных данных получают от персонала проекта и заданных статистических моделей. Эти знания определяют то, как сырые, последовательно полученные данные интерпретируются для обновления имитационной модели.

### **2.2.1. Знания операционной логики**

Знания относительно операционной логики могут быть представлены в виде иерархической структуры последовательной декомпозиции задач проекта на подзадачи, вовлеченные в рабочий процесс. Точнее говоря, операционная логика определяет события, действия и процессы и представлена в виде последовательности действий и взаимодействия между элементами деятельности. В данной работе определены концепции событий, действий и процессов для формулировки общего определения, подходящего как для создателей имитационной модели, так и для планировщиков строительства.

**Событие:** в дискретном моделировании работа системы представлена как хронологическая последовательность событий по прошествии времени [15]. Событие происходит в данный момент, и, что более важно, оно вызывает изменение в состоянии системы, такое как погрузка грузовика в очередь на погрузку. Событие – это самый малый временной элемент в имитационной модели, и его свойства могут использоваться для получения действия уровнем выше и для обработки данных.

**Действие:** действие – это то, что преобразует состояние системы по прошествии времени, которое инициируется одним событием и заканчивается другим, таким как погрузка грузовика, и означает начало события погрузки и завершение события погрузки.

Процесс: процесс – это хронологическая последовательность действий, описывающая продвижение объекта по системе, например транспортировка и процесс разгрузки.

Пример с GPS слежением за автотранспортными средствами показывает запись данных о местоположении, скорости и направлении транспорта в реальном времени, которые могут использоваться для определения «событий», означающих начало и завершение «действия». На основе информации об этом «событии» и заданной пользователем базе знаний процессов «действия» и «процессы», представленные сырыми, последовательно полученными данными, могут быть установлены и проанализированы с целью имитационного моделирования. Для выполнения этого осмысленного процесса знания в конкретной области в форме заданных пользователем правил должны устанавливаться для идентификации «событий» и для выводов, делающихся с момента «событий» до «действий» и «процессов». Пилотная система, представленная в разд. 3, приводит пример реализации этого подхода.

### 2.2.2. Моделирование входных данных

Другой аспект базы знаний связан с моделированием входных данных. По определению моделирование входных данных относится к процессу, который устанавливает нормальное распределение входных данных и их параметров, т. е. тип распределения и сопутствующие параметры продолжительности действия. Может быть использовано несколько способов для введения случайных входных сигналов в имитационную модель, включая эмпирическое распределение, распределение стандартной статистики и внешние модели для прогнозирования. Эмпирическое и стандартное распределения, такие как треугольные или бета-распределения, объединяют эффекты всех переменных (например, погоды), влияющих на имитационную модель входа в простой функции распределения, изображающей такую переменную, как продолжительность действия или принятия решения [16]. При желании, с целью дальнейшего совершенствования точности прогнозирования, некоторые переменные неопределенности, – например, погода и укомплектованность и их влияние на моделирование входных данных – могут явно воспроизводиться с помощью модели прогнозирования. Так, Wales и AbouRizk [17] разработали модель постоянно изменяющейся погоды и объединили ее с методом критического пути, основанным на сетевом моделировании проекта. Влияние погодных условий на продолжительность действий моделируется моделями нейронной сети. Zhang и другие предложили использование нечеткой логики для дискретного моделирования, при неопределенном количестве ресурсов, необходимых для активизирования действия [18]. Продолжительность действия, которое меняется с количеством привлекаемых ресурсов, определяется посредством нечеткой модели, основанной на системе правил. Для улучшения точности упреждающего планирования предложенный каркас снабжен открытой структурой для хранения в базе знаний и обновления передовых форм моделей прогнозирования и использования их при моделировании рабочего цикла для прогноза моделирования входных данных.



### 2.3. Адаптивное моделирование

Адаптивность – это способность системы приспосабливаться к конкретному использованию или ситуации. Основной функцией предлагаемого моделирования в реальном времени является способность приспосабливать заданную имитационную модель к постоянно меняющейся среде проекта. Такая способность адаптивного моделирования достигается через обновление как логики моделирования, так и моделей входа, когда они больше не могут точно выражать текущую и ожидаемую работу будущего проекта. Обновление модели вручную возможно, но быстро становится непрактичным для среды проекта, в которой присутствуют частые изменения. Долгосрочной целью компонента адаптивного моделирования является упрощение процесса обновления модели с использованием входных данных, взятых из полученных данных и компонентов базы знаний процессов, описанных выше. Например, значения, полученные в реальном времени, и последние значения продолжительности действия могут установить изменения в наборе данных продолжительности, основанном на последних измерениях, например, времени транспортировки. В качестве примера можно привести алгоритм определения изменения на основе контрольной карты Шухарта, широко применяемой в менеджменте качества. В частности, в настоящем исследовании используется контрольная карта скользящих размахов для установления изменений продолжительности действия [19]. Этот метод определяет границы регулирования путем постоянного вычисления скользящего среднего значения предыдущих измерений, взятых во временном интервале, установленном пользователем. Когда измерение текущего среднего находится за пределами границ регулирования, устанавливается и подтверждается событие изменения, а затем следует обновление модели входа. Другой пример: по данным GPS, экскаватор меняет свое местонахождение. На основе базы знаний, если два местонахождения связаны с двумя разными стройплощадками, то система придет к заключению, что экскаватор был передислоцирован с одной площадки на другую, тогда планировщик проекта будет проинформирован, и его попросят подтвердить необходимость немедленного обновления модели.

Такой самонастраивающийся процесс обоснован, если он удовлетворяет двум допущениям. Первое – данные, полученные в реальном времени, должны адекватно улавливать сигналы изменения системы относительно того, постоянные они или временные. Второе – адекватная и точная база знаний должна интерпретировать сигналы системы и изменения ее умозаключений. Как и любые методы поддержки принятия решений, эта функция адаптивного моделирования предлагает поддержку принятия решений в плане обновления модели, но она не может полностью заменить решения, принимаемые человеком. Все еще требуется вмешательство пользователя для подтверждения или опровержения системных изменений, установленных процессом адаптивного моделирования.

Когда системное изменение подтверждено, имитационная модель должна обновляться в соответствии с этим изменением. Такое обновление может быть проведено либо в рабочее время, либо в режиме офлайн. На этой стадии исследований принят офлайновый подход. При этом подходе в первую оче-

редь проверяются операционная логика и модели входа, а затем проводятся новые эксперименты по моделированию. Обновление моделей входа может повлечь изменения видов нормального распределения, параметров распределения и даже методов моделирования входных данных. Наборы данных, собранные в реальном времени, могут использоваться для согласования с набором стандартных распределений, и распределение, соответствующее наилучшим образом, может быть выбрано для замены устаревших моделей входа [20]. Для случаев, когда был задан особый вид распределения, наборы данных в реальном времени могут помочь отрегулировать параметры распределения. Применение операционной логики и изменений модели входа в имитационной модели может быть автоматизировано, как описано в разд. 3.

#### 2.4. Службы имитационного моделирования

Имитационное моделирование, необходимое для моделирования в реальном времени, включает в себя верификацию модели, ее обоснование, выполнение моделирования и сбор выходных данных. Многие доступные программные средства моделирования предлагают такие функции моделирования, как графическое моделирование, имитационные алгоритмы и анализ выходных данных. Они позволяют пользователям завершить конструирование моделей, провести эксперименты по имитационному моделированию и выполнить анализ данных. Однако перед экспериментом имитационная модель должна быть верифицирована и обоснована. Такой процесс обработки модели обычно проводится с интенсивным вмешательством человека. При моделировании в режиме реального времени системная модель должна постоянно корректироваться с целью отображения системных изменений. Следовательно, службы имитационного моделирования должны обеспечить эффективную поддержку верификации и обоснования модели имитационного моделирования. На рис. 2 представлен полный цикл процесса моделирования в реальном времени, который также показывает взаимосвязь между службами имитационного моделирования и тремя другими компонентами системы.

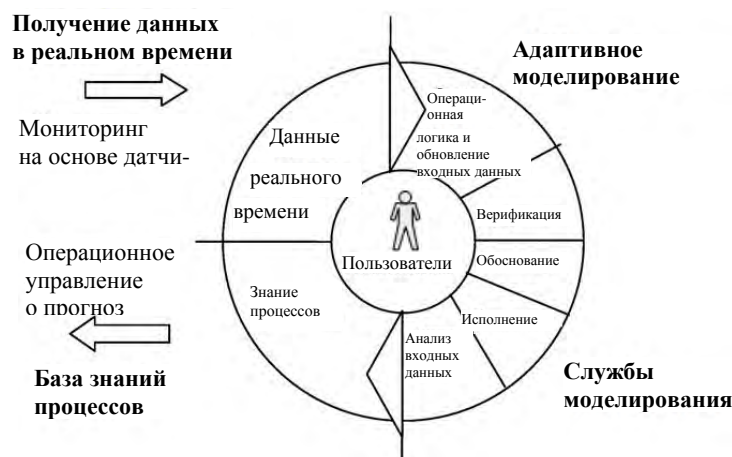


Рис. 2. Процесс моделирования в реальном времени и службы моделирования

Становится понятным, что данные, полученные в реальном времени, дают возможность провести автоматизированный процесс обоснования и верификации модели, как показано ниже. Верификация модели проверяет, работает ли должным образом и логически обновленная имитационная модель. Некоторые технические приёмы могут быть компьютеризированы и использоваться для упрощения процесса верификации. Например, кривая имитационного моделирования, описывающая события имитационной модели в упорядоченной последовательности, является одним из самых мощных способов верификации [15]. Кривая моделирования может сочетаться с данными реального времени для компьютеризации модели верификации. Для этого имитационной модели задается тот же набор статических входных данных, которые записываются с реальной системы. Затем для получения кривой моделирования может быть проведен имитационный эксперимент. Далее смоделированные события сравниваются одновременно с реальными событиями, записанными реальными данными. Различия должны быть количественно измерены, а пользователи предупреждаются о наличии существенных отклонений.

В отличие от верификации, обоснование модели определяет, является ли модель стохастического моделирования точным образом реальной системы. Когда система уже существует, самым объективным критерием оценки модели будет сравнение выходных данных модели с фактическими данными, полученными в реальном времени. Это можно осуществить путем обоснования преобразования ввода-вывода данных или обоснования использования накопленных данных [5]. Когда реальные данные становятся доступными, методы верификации могут сочетаться с классическими статистическими критериями с целью автоматизации обоснования модели. Кроме того, когда при обосновании модели используются накопленные данные, подробное сравнение системы и модели входа на уровне действия может также помочь пользователям обнаружить проблемы, связанные с точностью, и установить коренные причины различий. Пилотная система, представленная в разд. 3, использует подход доверительного интервала к автоматизации обоснования модели. Кроме того, для верификации и обоснования модели чрезвычайно важна анимация, поскольку она позволяет всем участникам проекта и экспертам «увидеть» виртуальную версию работы [21]. В нашей пилотной системе анимация используется и как опция для конечных пользователей при обосновании модели.

Интеграция моделирующих компонентов, описанная выше, предназначена для преобразования текущего процесса моделирования из входного моделирования в обоснование модели с целью более эффективного и простого процесса, необходимого для упреждающего планирования. Для иллюстрации некоторых основных возможностей предложенной системы в следующем разделе приведено описание пилотной системы, разработанной для перевозки асфальта и укладки дорожных покрытий.

### 3. Пилотная система

Подрядчики трудоемких строительных работ работают в уникальных условиях, характеризующихся различными ресурсными ограничениями, не-

определенностью окружающей среды и препятствиями, спровоцированными техническими и экологическими факторами. Успешные выполнение и управление данными проектами зависят от эффективного подхода упреждающего планирования, который может зафиксировать динамические проектные данные и объединить их с разработкой графика предстоящей работы. Предложенный каркас адаптивного моделирования в реальном времени был внедрен для обеспечения упреждающего планирования. Дается описание работ по перевозке асфальта и укладке дорожных покрытий, а затем – пилотной системы и конкретных ситуаций.

### **3.1. Перевозка асфальта и укладка дорожных покрытий**

Перевозка асфальта и укладка дорожных покрытий являются важными проектами дорожных работ и магистралей. Горячая асфальтовая смесь обычно производится на центральном заводе по приготовлению асфальта и перевозится на грузовиках на строительные участки для укладки. Здесь дано краткое описание работ на асфальтовом заводе и строительных участках, расположенных в Центральной Луизиане. Асфальтовая установка имеет двухкамерный барабан, который смешивает, нагревает и перемешивает все компоненты с битумным раствором, а затем осуществляет непрерывный поток битумного раствора. Свежий битумный раствор хранится в бункерах, из которых затем отправляется в самосвалы. Кузова самосвалов орошаются разделительным агентом, а затем в них загружается битумный раствор. Каждому самосвалу выдается билет для въезда на стройплощадку. На стройплощадке битумный раствор разгружается в перегружатель асфальтобетонной смеси, который служит буфером между самосвалами и асфальтоукладчиком. Перегружатель асфальтобетонной смеси может принять асфальтовую смесь одновременно с перемещением смеси в асфальтоукладчик. После разгрузки самосвал возвращается на завод за новым циклом погрузки.

### **3.2. Внедрение пилотной системы**

С целью упреждающего планирования пилотная система объединяет технологию слежения GPS с моделированием. Работы по перевозке и укладке дорожных покрытий зависят от тяжелой техники, и строительные действия и события обычно связаны с местоположением, скоростью или направлением движения единицы оборудования. Отслеживание местоположения на базе GPS стало коммерчески доступно для мониторинга тяжелого строительного оборудования, такого как экскаваторы, грузовики и асфальтоукладчики. GPS использует спутники, которые передают точные сигналы, позволяющие GPS-приемнику, установленному на транспортном средстве, определить местоположение, скорость, направление движения и время. Поскольку эти данные локально хранятся в GPS-приемнике транспортного средства, делая их доступными в реальном времени для удаленного моделирования, сервер требует постоянной передачи этих данных. Это достигается путем прикрепления GPS-приемника к модему, который отправляет данные по беспроводной сотовой сети. Данные корректируются в режиме реального времени, когда такой запрос поступает от пользователя, или же они могут обновляться автоматически че-

рез определённые промежутки времени, например через 1 мин. В дополнение к устройствам GPS могут приобретаться и другие источники реального или почти реального времени. В этом проекте система УЧПУ на базе персональной ЭВМ, которая управляет установкой для приготовления асфальта, обеспечивает данные о номере операций, местоположении операции, виде материала и массе груза для прогрессивного и эффективного измерения. В пилотной системе данные GPS и другие оперативные данные хранятся в базе данных Microsoft Access.

Для извлечения данных, необходимых для имитационного моделирования, – например, время погрузки грузовика и время транспортировки – знания, касающиеся различных событий и действий, вовлеченных в работу, должны использоваться для содействия интерпретации данных. Для объединения местоположения грузовика в событие используется концепция «геозоны» [22]. Геозона – это область, определяемая вокруг зафиксированного географического участка, или интересующий подвижный объект, такой как асфальтоукладчик. Геозоны могут определяться персоналом проекта для таких областей, как полосы погрузки для асфальтовых установок и местоположение асфальтоукладчика. На рис. 3 изображен пользовательский интерфейс, показывающий группу геозон, определенных пользователем. Когда грузовик следует через границу в геозону асфальтового завода, загружается событие начала погрузки, а когда он выезжает за границу завода, то идет запись окончания события погрузки. Если необходима более высокая точность измерения времени, частота обновления данных GPS может быть настроена в течение от нескольких минут до нескольких секунд, когда транспортное средство приближается к геозоне или находится в пределах интересующей геозоны.

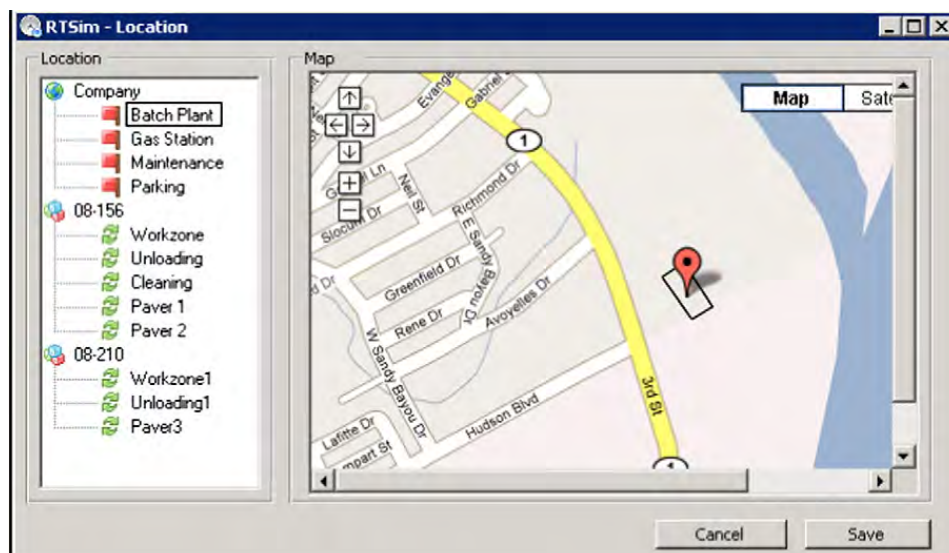


Рис. 3. Геозоны, определенные пользователем

После того как определены события, знания, обработанные персоналом проекта, снова нуждаются в умозаключениях, начиная с событий и заканчивая

действиями, а также начиная с действий и заканчивая процессами. Как описано в концептуальном каркасе, эти знания организованы в виде иерархически выстроенных правил. Например, образцы правил для процесса погрузки-разгрузки самосвала показаны на рис. 4.

В этом проекте делаются попытки разделить время ожидания грузовика от погрузки до разгрузки (причина этого объяснена в ситуации 1 разд. 4). Время передвижения в рабочую зону и из нее детально смоделировано в качестве действий с целью сбора данных для оценки влияния управления движением в зоне транспортировки. Но изучение этого влияния выходит за рамки данной статьи и далее обсуждаться не будет.

Поскольку пилотная система проводит корректировку модели с использованием подхода, описанного выше, выбор инструмента дискретного моделирования во многом зависит от предложенной системы адаптивного моделирования в реальном времени.

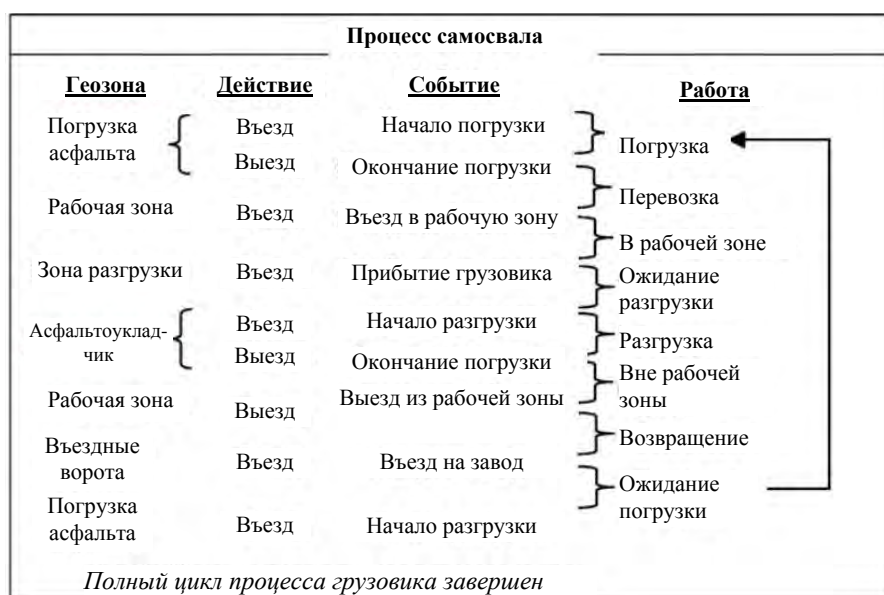


Рис. 4. Процесс работы самосвала

Пилотная система использует инструмент схематического моделирования Simio для обеспечения основных служб дискретного моделирования, а также превосходную трехмерную модель визуализации [23]. Модель выборки, разработанная в Simio, показана на рис. 5. Согласно этой модели, ресурсы включают установку по приготовлению асфальта, семнадцать грузовиков одинакового размера, один перегружатель асфальтобетонной смеси и один асфальтоукладчик с загрузочным отсеком емкостью в один грузовик.

В пилотной системе изменения модели операционной логики включают добавление и стирание действий, а также логических связей. Изменения модели входа включают изменяющиеся виды распределений и параметров. Использовалась библиотека разработчика для автоматической коррекции проек-

тов имитационного моделирования из внешних приложений, таких как Microsoft Access, которое применялось в данном исследовании. Любой аспект имитационной модели может полностью контролироваться из библиотеки, что означает автоматическое обновление модели после того, как подсистема адаптивного моделирования сделает запрос изменений.

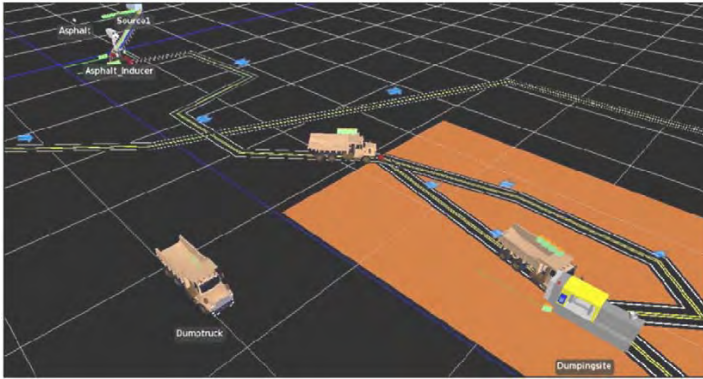


Рис. 5. Имитационная модель в Simio

Изменения модели входа пилотной системы были автоматизированы с помощью данных GPS и программы автоматизированной подгонки данных к лучшему распределению BestFit [20]. BestFit подгоняет набор данных к 28 различным нормальным распределениям, и распределения, подогнанные наилучшим образом, используются в моделировании. Пакет разработчика BestFit использовался для автоматизации функции выравнивания данных пилотной системы. Опционально результаты выравнивания данных могут быть представлены для подтверждения конечным пользователям, как показано на рис. 6.

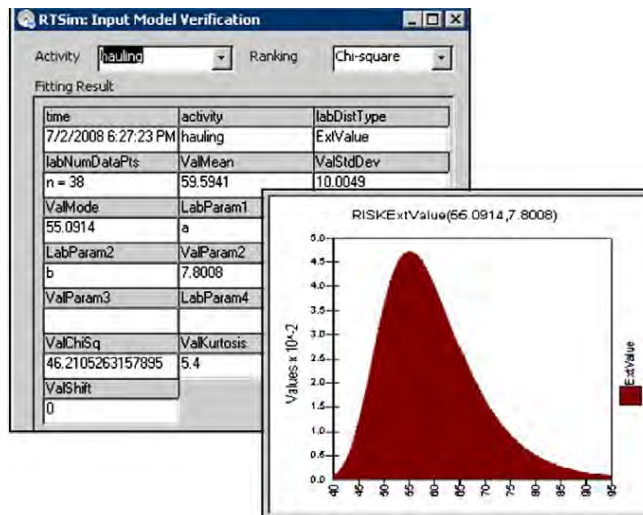


Рис. 6. Автоматизированное моделирование входных данных



Обоснование модели автоматизировано с помощью подхода доверительного интервала, основанного на данных реального времени. Цикл работы грузовика является важным критерием выполнения перевозки асфальта и укладки дорожного покрытия и выбран для обоснования модели. Фактические данные были собраны с модели проекта, которая будет описана в следующем разделе. Парный подход (paired-t approach) используется для создания доверительных интервалов для разницы между наблюдаемой средней длительностью цикла и смоделированной средней длительностью цикла [15]. 95 % доверительных интервалов разности равны (-9,9, 10,6). Поскольку интервал содержит 0, был сделан вывод, что наблюдаемая разность не является статистически значимой на 95%-м уровне доверительной вероятности, т. к. может быть интерпретирована как колебания выборки.

#### 4. Конкретные ситуации

В этом разделе представлены 2 конкретные ситуации для демонстрации возможностей пилотной системы. Первая ситуация показывает, как пилотная система адаптируется к изменениям рабочей среды проекта, а вторая – возможности моделирования комплексных согласованных проектов.

##### 4.1. Ситуация 1

Модель проекта включает земляные работы, дренажные сооружения, асфальтобетонную стяжку и сопутствующие работы по расширению большого участка автострады 84 Соединенных Штатов Америки (более 2 тыс. км) с двух- до четырехполосного движения. Изначально для этого проекта подрядчик запланировал 20 самосвалов и 1 асфальтоукладчик, и все они были оборудованы устройствами GPS для сбора данных в режиме реального времени. Базовая имитационная модель, ранее утвержденная проектом, основанном на проектном плане и накопленных данных, определяла пять действий: погрузку асфальта, перевозку, разгрузку, укладку и возвращение. Например:

- фактически в проекте было задействовано только 17 грузовиков, остальные три были передислоцированы по разным причинам на другие работы;
- фактическое время ожидания на асфальтовом заводе было намного больше, чем время ожидания в очереди, измеренное базовой имитационной моделью;
- фактическое время перевозки и возвращения было значительно больше, чем ожидалось из-за дорожного движения в рабочей зоне и проблем с управлением транспортным потоком.

Эксперименты показали, что эти изменения не соответствуют значениям длительности цикла работы грузовика, по меньшей мере, на 20 %. В этой ситуации данные, полученные в реальном времени в первый день проекта, использовались для обновления базовой модели прогнозирования предстоящих работ. Пилотная система ввела данные о количестве грузовиков в проект и откорректировала их наличествующее число. Фактическая продолжительность действий использовалась для обновления операционной логики и модели входа. Возможность системы разрешить проблему времени ожидания возле установки для изготовления асфальта описана ниже.



В типичной имитационной модели время ожидания в очереди определяется реальным временем прибытия и временем серверной службы. Например, длительность ожидания грузовика возле асфальтовой установки может быть получена из его времени прибытия, длины очереди и длительности погрузки. Следовательно, в базовой модели это время ожидания не было смоделировано как действие, а рассматривалось как модель выхода. Однако фактически наблюдаемое время ожидания дольше, чем нормальное, полученное имитационной моделью, потому что асфальтовый завод одновременно обслуживает грузовики из других проектов и других внешних заказчиков. Расширение возможностей модели для включения в нее этих ситуаций не всегда практично, а немедленным решением такой ситуации является подробное моделирование дополнительной задержки в качестве действия. В пилотной системе применялись следующие процедуры обоснования и обновления модели:

1. Разница между фактическим средним временем ожидания и смоделированной средней величиной измерялась статистически, а запрос изменений вводился, когда разница превышала контрольный предел, в три раза превосходящий стандартное отклонение.

2. После получения запроса изменений моделировалась дополнительная задержка из-за внешних процессов в качестве нормального распределения. Такое моделирование входных данных использует собранные данные о задержке во время фактической работы, и задержка оценивается следующим образом:

Задержка = (Время начала погрузки – Время въезда в ворота завода) – Длина очереди · Среднее время погрузки

3. Задержка действия с подобранным распределением автоматически вводилась в базовую модель и должным образом связывалась с действием погрузки.

4. Затем проводились имитационные эксперименты как часть постзапросной процедуры.

В данной ситуации была определена дополнительная задержка, и произведено экспоненциальное распределение со средним значением 16,3 мин. Действие «задержка на заводе» было введено в базовую модель, и лишь одно это изменение сократило погрешность предсказания заданного цикла на 6%.

#### 4.2. Ситуация 2

Эта ситуация была разработана для демонстрации возможности системы моделировать комплексные одновременные проекты по перевозке асфальта и укладке дорожного покрытия. Для сокращения времени, необходимого для построения базовой модели, были определены геозоны, общие для проектов перевозки асфальта и укладки дорожного покрытия, объединенные с элементами моделирования многоразового использования. Например, геозоны и имитационные модели, характеризующие различные асфальтовые заводы, имеют одинаковую операционную логику. На рис. 7 изображены две геозоны, как правило, определяемые для асфальтового завода наряду с событиями и действиями, и соответствующий имитационный модуль. Модуль сохраняется и объединяется так, чтобы когда геозона для асфальтового завода создается

пользователем, ее имитационная модель создается автоматически. Был также создан подобный геозонный элемент многоразового использования для рабочего участка асфальтоукладчика. Такие геозонные элементы затем использовались для моделирования трех одновременных проектов, которые обслуживались одним и тем же асфальтовым заводом, но располагались на разных строительных площадках.

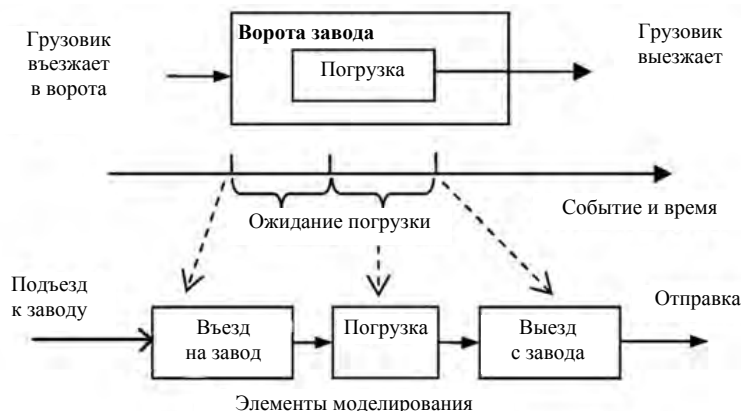


Рис. 7. Геозонный элемент для завода

Действия между заводом и зоной для асфальтоукладчика моделируются по умолчанию как время транспортирования. Одна геозона для завода и три геозоны для асфальтоукладчика сначала наносятся пользователем на карту. Затем модель генерируется автоматически для трех строительных площадок и асфальтового завода. Модель, созданная на компьютере, идентична модели, произведенной вручную, но построение модели на компьютере требует гораздо меньше времени, благодаря объединению геозон с имитационными элементами многоразового использования.

### Заключение

Моделирование в реальном времени оспаривает способ, которым проводится модельный анализ, но в то же время данные, полученные в реальном времени, увеличивают потенциал оптимизированного моделирования и проведения эксперимента по краткосрочному планированию. Как показано в предложенном каркасе, данные реального времени способствуют автоматизации сбора данных, обновления модели, верификации и проверки правильности данных. При окончательном внедрении автоматизированных процессов конечные пользователи могут сосредоточиться на сути планирования и управления проектом вместо выполнения требований имитационного моделирования как такового. Пользователи освобождаются от времязатратного сбора данных и могут направить свою деятельность на построение знаний процессов. Автоматизированная верификация и проверка данных влияют на ответственность конечных пользователей, начиная от программирования мо-

дели и устранения неполадок и заканчивая мониторингом и принятием решений. Пилотная модель и реальные ситуации показали, что предложенное программное обеспечение в состоянии провести коррекцию операционной логики имитационной модели и модели входа, чтобы отразить изменения в режиме работы в реальном времени в целях упреждающего планирования.

Для полного охвата потенциала предложенной концепции необходимы дополнительные исследования. Они включают процесс более полного сбора и совместной обработки данных, лучшего представления экспертных знаний и более плотной интеграции этих знаний с данными реального времени, а также новую имитационную платформу, которая проводит обновление модели в рабочее время.

### Благодарность

Этот проект частично финансировался грантом Fluor Partner. Авторы выражают благодарность Кейзи Куперу из компании Gilchrist Construction Company LLC, Фернандо Рамосу и Кэти Арнольд из компании Heavy Construction Systems Specialists, Inc. за предоставление доступа к рабочим площадкам и проектным данным.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *R.L. Peurifoy, C.J. Schexnayder, A. Shapira*, Construction Planning and Equipment and Methods [Планирование строительства и строительное оборудование и методы], 7th ed. McGraw Hill, New York, 2006.
2. *J. Hinze*, Construction Planning and Scheduling [Планирование строительства и составление графика], Prentice Hall, New York, 2007.
3. *D.W. Halpin, L.S. Riggs*, Planning and Analysis of Construction Operations [Планирование и анализ строительных работ], John Wiley & Sons, New York, 1992.
4. *S.M. AbouRizk*, Role of simulation in construction engineering and management [Роль моделирования в строительстве и менеджменте], Journal of Construction Engineering and Management 136 (10) (2010) 1140–1153.
5. *J. Banks*, Handbook of Simulation [Руководство по моделированию], John Wiley & Sons, New York, 1998.
6. *W.J. Davis*, Online simulation: need and evolving research requirements [Онлайн моделирование: необходимость и требования к соответствующим научным исследованиям], in: J. Banks (Ed.), Handbook of Simulation, John Wiley & Sons, New York, 1998, pp. 465–518.
7. *H.J. Yoon, W. Shen*, Simulation-based real-time decision making for manufacturing automation systems: a review [Принятие решений в реальном времени на основе моделирования для систем автоматизации производства], International Journal of Manufacturing Technology and Management 8 (2006) 188–202.
8. *F. Darema*, Dynamic data driven applications systems: a new paradigm for application simulations and measurements [Динамические данные с управлением данными: новая парадигма для моделирования и измерений], Proceeding of International Conference on Computational Science, Krakow, Poland, 2004.
9. *FIATECH*, Capital Project Technology Road Mapping Initiative [Проект капитального строительства составления карт-схем автомобильных дорог], FIATECH, Austin, Texas, 2011.
10. *R. Navon, Y. Shpatnitsky*, A model for automated monitoring of road construction [Модель для автоматизированного мониторинга строительства дорог], Construction Management and Economics 23 (9) (2005) 941–951.

11. *T.H. Chung, Y. Mohamed, S.M. AbouRizk*, Bayesian updating application into simulation in the North Edmonton sanitary trunk tunnel project [Приложение для байесовской корректировки в моделировании санитарного магистрального тоннеля в Северном Эдмонтоне], *Journal of Construction Engineering and Management* 132 (8) (2006) 882–894.
12. *M. Lu, F. Dai, W. Chen*, Real-time decision support for planning concrete plant operations enabled by integrating vehicle tracking technology, simulation, and optimization algorithm [Поддержка принятия решений в реальном времени при планировании работ на бетонном заводе, запущенном путем объединения технологии контроля за транспортом, моделирования и оптимизационного алгоритма], *Canadian Journal of Civil Engineering* 34 (2007) 912–922.
13. *N. Ackroyd*, Earthworks scheduling and monitoring using GPS [Составления плана земляных работ и мониторинг с использованием GPS], *Proceeding of Trimble Users Conference*, San Jose, California, 1998, pp. 1–6.
14. *L. Song, S.M. AbouRizk*, Virtual shop model for experimental planning of steel fabrication projects [Виртуальная модель цеха для экспериментального планирования проектов по производству стали], *Journal of Computing in Civil Engineering* 20 (5) (2006) 308–316.
15. *A.M. Law, W.D. Kelton*, *Simulation Modeling & Analysis* [Имитационное моделирование и анализ], 3rd ed. McGraw-Hill, New York, 2000.
16. *S.M. AbouRizk, A. Sawhney*, Subjective and interactive duration estimation [Субъективная оценка продолжительности взаимодействия], *Canadian Journal of Civil Engineering* 20 (3) (1993) 457–470.
17. *R.J. Wales, S.M. AbouRizk*, An integrated simulation model for construction [Модель интегрированного моделирования для строительства], *Simulation Practice and Theory* 3 (1996) 401–420.
18. *H. Zhang, C.M. Tam, J.J. Shi*, Application of fuzzy logic to simulation for construction operations [Применение нечеткой логики в моделировании строительных операций], *Journal of Computing in Civil Engineering* 17 (1) (2003) 38–45.
19. *D.J. Wheeler, D.S. Chambers*, *Understanding Statistical Process Control* [Понимание системы статистического контроля], 2nd ed. SPC Press, Knoxville, TN, 2003.
20. *BestFit*, *BestFit User Manual* [Руководство пользователя BestFit], Palisade Corporation, New York, 2003.
21. *J. Martinez*, Methodology for conducting discrete-event simulation studies in construction engineering and management [Методика проведения исследований дискретного моделирования в строительстве и управлении], *Journal of Construction Engineering and Management* 136 (1) (2010) 3–16.
22. *HCSS*, *The Dispatcher User Guide* [Программа по руководству пользователя], Heavy Construction Systems Specialists, Inc., Houston, Texas, 2008.
23. *Simio*, *Simio User Help* [В помощь пользователю Simio], Simio LLC, Sewickley, PA, 2010.