

Новые возможности имитационного моделирования социально-экономических систем

Паринов С.И., дтн, гнс ЦЭМИ РАН, профессор ГУ-ВШЭ

Введение

Имитационное компьютерное моделирование, включая его современное агентное направление, в приложениях к исследованию путей совершенствования уже действующих и проектированию новых социально-экономических систем обречено на постоянное внимание и популярность. Это связано с особым значением для жизни человека такой специфической деятельности людей, как мысленное проигрывание различных ситуаций. Для повышения эффективности именно этого вида деятельности и направлено развитие методов компьютерного имитационного моделирования.

Все категории людей, организующих взаимодействия между другими людьми (менеджеры, управленцы, бизнесмены и др.), тратят значительные усилия и достаточно много времени на проигрывание и анализ возможных вариантов развития событий. Одним из следствий общественного прогресса является увеличение сложности социально-экономических процессов. Это означает, что задачи, которые решают управленцы по организации взаимодействия людей становятся со временем все более сложными. Как только затраты на освоение и использование программно-технических средств, позволяющие сделать эту деятельность более эффективной, станут приемлемыми для основной массы управленцев, то массовый рост интереса к подобным средствам неизбежен.

Методы имитационного моделирования получили значительное развитие в последние десятилетия. Последним достижением в этой области стало агентное моделирование. Появилась возможность описывать социально-экономические взаимодействия и порождаемые ими процессы практически без упрощений, в их реалистичном виде. В последние годы также произошли существенные сдвиги в области создания доступных массовому пользователю средств для компьютерного имитационного моделирования, включая и его агентное направление. Есть основания считать, что эти достижения в существенной степени увеличили доступность компьютерного имитационного моделирования и рубеж, отделяющий его от массового использования, скоро будет перейден.

С учетом этого важность и актуальность получения методических знаний об имитационном моделировании и практических навыков в его компьютерной реализации трудно переоценить. Одним из современных и наиболее мощных средств для компьютерного имитационного моделирования (включая агентное) является пакет **AnyLogic**.

Современное понимание задач имитационного моделирования

Основное назначение имитационного компьютерного моделирования деятельности человека - поиск возможностей совершенствования функционирования социально-экономических систем. Подобные исследования могут ставить целью совершенствование уже существующих и давно работающих организационных механизмов и систем

(прикладные задачи для моделирования), а также поиск новых подходов к организации и управлению совместной деятельности людей (организационный инжиниринг), включая конструирование организационных и бизнес систем с заранее заданными свойствами. В этом последнем случае имитационное моделирование помогает развитию научных представлений о свойствах и возможностях социально-экономических систем.

Компьютерное имитационное моделирование дает наилучший результат в тех областях, где участники социально-экономической деятельности тратят значительные усилия и достаточно много времени на мысленное проигрывание и анализ возможных вариантов развития событий. Чем сложнее ситуация, чем больше объектов, факторов и возможных сценариев приходится человеку проигрывать в голове в различных комбинациях друг с другом, тем больший эффект можно ожидать от применения имитационной модели для анализа ситуации, поиска и принятия оптимальных решений.

Одними из последствий общественного прогресса является рост связанности между различными областями деятельности людей, увеличением количества технологий, локальное применение которых, может иметь глобальные последствия, и как следствие - быстрое повышение комплексности/сложности социально-экономической среды обитания человека. В этих условиях задача компьютерного имитационного моделирования – дать лицам, принимающим решения, а также исследователям социально-экономических систем эффективные инструменты для поиска решений в организации взаимодействия людей, отвечающих современным вызовам.

В условиях роста взаимозависимостей между процессами и различными сферами деятельности людей, которые прежде не оказывали влияние друг на друга, есть еще одна важная задача современного компьютерного имитационного моделирования – создание средств и механизмов для поддержания деятельности людей в скоординированном состоянии, нетривиальность которой определяют следующие два важных фактора:

- большое количество и/или быстрое увеличение количества взаимодействующих участников,
- увеличение интенсивности изменений в возможностях/намерениях участников и в общих условиях для деятельности, которые необходимо согласовывать в реальном времени.

Для получения полных и систематичных представлений о формах и методах (подходах) современного имитационного моделирования в социально-экономической сфере рекомендуем книгу [Карпов Ю.Г.] и публикации в журнале *Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASSS)* (<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/>).

Агентный подход занимает в современном имитационном моделировании социально-экономических систем центральное место. Его появление можно рассматривать как результат эволюции методологии моделирования: переход от моно моделей (одна модель – один алгоритм) к мульти моделям (одна модель – множество независимых алгоритмов). Агентное моделирование органично включает в себя другие имеющиеся подходы имитационного моделирования, поскольку они могут применяться "внутри" агентной модели при формализации ее отдельных активных объектов или агентов.

Мультиподходные архитектуры моделей

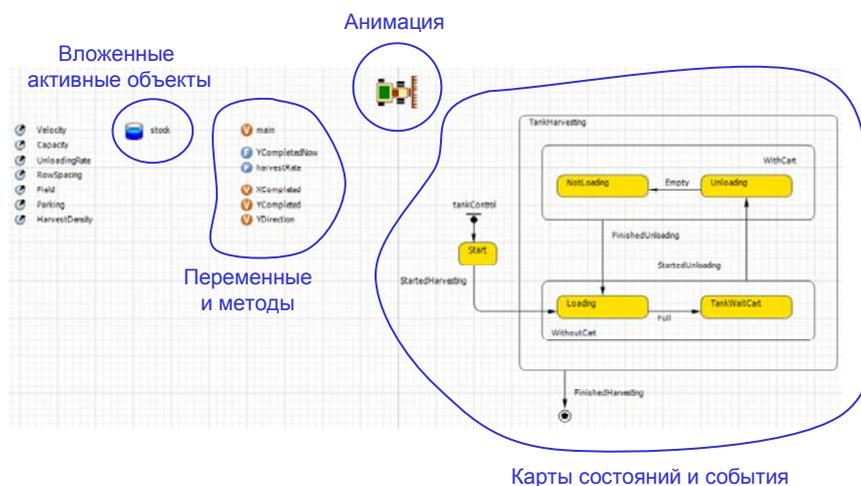


© 2002-2007 ООО «Экс Джей Текнолоджис» www.xjtek.ru

9

Диagr. 1. Схема комбинирования 3-х подходов имитационного моделирования внутри агентной модели

Что может быть внутри агента?



© 2002-2007 ООО «Экс Джей Текнолоджис» www.xjtek.ru

21

Диagr. 2. Схема возможного внутреннего состояния агента в AnyLogic

На диаграммах 1 и 2 представлены схемы, предложенные разработчиками пакета AnyLogic, для комбинирования трех наиболее популярных в настоящее время подходов имитационного моделирования (на схемах "СД" обозначает подход "системная динамика", а "ДС" – дискретно-событийный подход). Следует особо отметить, что подходы системной динамики и дискретно-событийного моделирования позволяют конструировать только моно модели, т.к. не позволяют органично объединить внутри одной модели разные методы имитационного моделирования.

Прикладное имитационное моделирование

Приложение имитационного моделирования к действующим технологическим, бизнес и управленческим системам дает хорошие результаты в оперативном и стратегическом управлении предприятием, производством, логистикой, цепочками поставок. Это полезно особенно в ситуациях с большим количеством элементов, сложными связями друг с другом и непредсказуемым развитием событий. Современные инструменты имитационного компьютерного моделирования позволяют, например, следующее (см. примеры на рис. 1-5, а также пояснения к ним):

1. Компактное и наглядное (анимированное) представление информации о состоянии и поведении сложной системы любого вида для быстрого анализа ситуации и принятия решений. Функционирование больших/сложных бизнес систем может быть представлено в виде наглядной/реалистичной картины изменения состояния элементов системы и связей между ними. Руководитель может одним взглядом охватить и оценить информацию, для анализа которой в традиционной форме (таблицы и графики) требуются большие затраты сил и времени.
2. Анализ различных сценариев развития событий и поиск наилучших решений (включая решение оптимизационных задач) для функционирования сложных технологических и бизнес систем/процессов любого вида. Задание сценариев и просмотр результатов может выполняться через Интернет.
3. Поддержание скоординированности и нахождение согласованных решений между территориально распределенными руководителями связанных между собой бизнес структур. Руководители могут формулировать свои предложения в виде сценариев для модели, имитирующей их связанную систему производств, и коллективно проигрывать последствия от совокупности предлагаемых ими действий. Сама модель может быть установлена в Интернете и открыта как для просмотра результатов ее работы, так и для изменения входных данных строго по установленным правилам доступа.
4. Сравнение реальных процессов с их модельным эталоном в целях выявления причин и источников нарушения нормального функционирования бизнес систем. Высокая точность модельного воспроизведения работы технологических, организационных или смешанных систем, которая возможна в современном имитационном моделировании, позволяет руководителям воспроизводить на модели ситуации, проясняющие, какие внутренние и/или внешние факторы на самом деле привели к нарушению нормального функционирования системы.
5. Анимированные презентации с реалистичным/наглядным представлением сложных ситуаций и процессов. Включая возможность проигрывания различных сценариев поведения демонстрируемого объекта в процессе его презентации.

Приведенный список не исчерпывает варианты приложений имитационного моделирования для совершенствования существующих организационных механизмов и систем. Другие возможности применения имитационного моделирования в бизнесе см., например, на <http://www.xjtek.com/consulting/solutions/>

Ниже предлагаются примеры реальных моделей, иллюстрирующие возможности современного компьютерного имитационного моделирования. Все эти модели разработаны компанией **XJ Technologies** (<http://www.xjtek.com/>). Полный список

демонстрационных моделей находится на http://www.xjtek.com/anylogic/demo_models/ (для запуска моделей с сайта нужно открыть соответствующий раздел в левом столбце и кликнуть на картинку с изображением модели).

Все приведенные примеры моделей реализованы в модельном комплексе **AnyLogic**, также разработанного компанией **XJ Technologies**. О возможностях **AnyLogic** см. в следующих разделах.

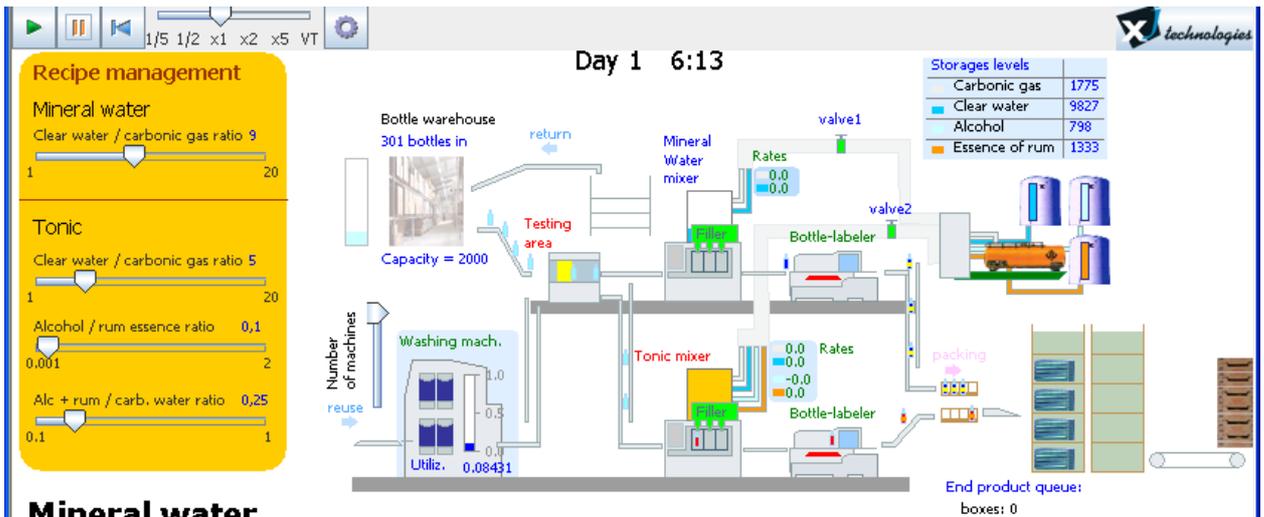
Модель "Производство минеральной воды и тоника"

На рис. 1 приведены примеры работы модели, имитирующей технологическую линию по производству минеральной воды и тоника, включая складирование и вывоз готовой продукции. Ссылка на работающую версию этой модели находится на странице http://www.xjtek.com/anylogic/demo_models/manufacturing_logistics/ под названием **Beverage Production** (здесь же дано описание как запустить модель). Полный исходный код данной модели включен в дистрибутив AnyLogic 5 (находится в разделе "Примеры" в подразделе "Manufacturing and Logistics").

В работающем виде данная модель содержит следующие основные элементы (см. рис 1):

- анимированное представление всех элементов технологического процесса производства минеральной воды и тоника, включая индикаторы текущего состояния каждого элемента;
- меню модели, включающее семь изменяемых параметров в виде ползунка, позволяющее в процессе работы модели менять некоторые условия работы данного технологического процесса (рецептуру минеральной воды и тоника, количество моющих машин для бутылок, количество подъемно-разгрузочных машин и количество контейнеров, которые они могут перевозить);
- текстовые пояснения к выводимой информации, а также описание как переключать анимированное представление работы данного производства на технологическую линию или на склад готовой продукции (на рис. 1 верхняя картинка показывает технологическую линию, а нижняя - склад).

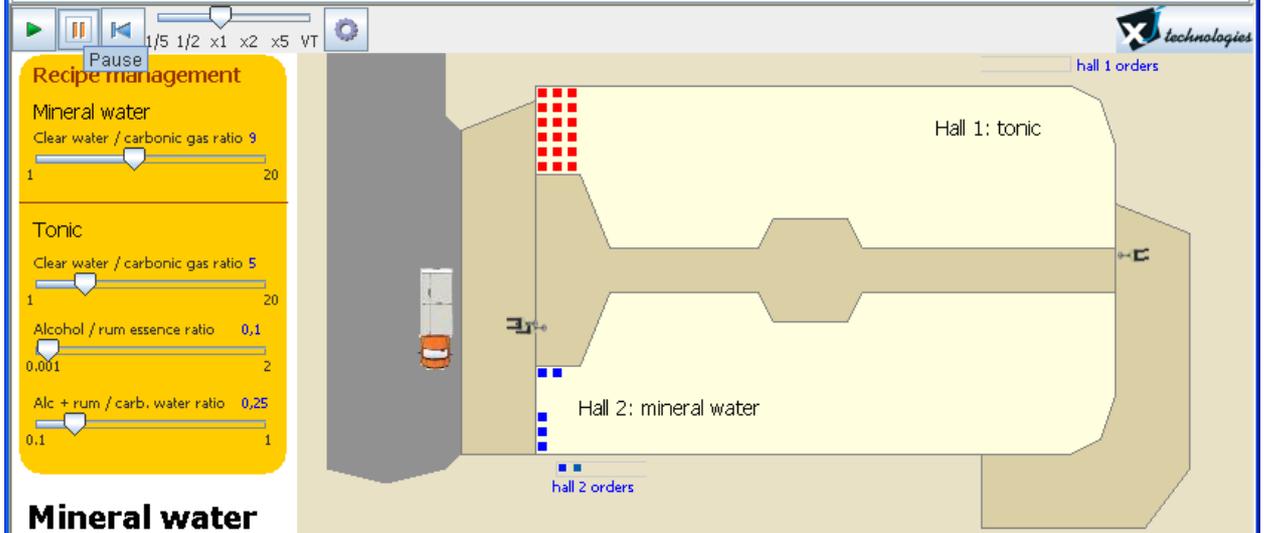
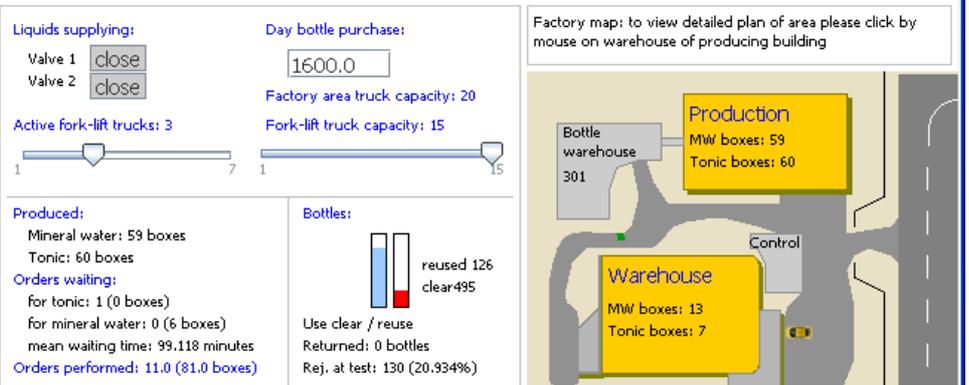
При запуске модели анимированная схема технологического процесса приходит в движение слева направо. Пустые бутылки поступают из двух источников: новые и уже ранее использованные. Ранее использованные бутылки сначала попадают в мойку (можно задать количество моющих машин). Затем бутылки из обоих источников проходят проверку и раздваиваются на линию подготовки минеральной воды и тоника. Напитки готовятся из ингредиентов, запасы которых заданы в модели: вода, углекислый газ, спирт и ромовая эссенция, смешиваемых в заданных пропорциях (пропорции можно менять параметрами "рецептура"). Заполненные бутылки проходят через два аппарата по наклеиванию этикеток, затем складываются в ящики. Как только на выходе технологической линии (верхняя часть рис. 1) скапливается 5 ящиков напитков, за ними приходит автомобиль, который доставляет их контейнером на склад.



Mineral water and Tonic Production

Clean bottles are delivered from a bottle warehouse. Dirty bottles (reuse) are washed. Bottles are distributed between the two lines where they are filled with mineral water and tonic. Drinks are made by mixing of liquids from tanks. Bottles are marked, packed and sent to the warehouse. Forklift trucks then load boxes into arriving trucks according to orders received.

technologies
This AnyLogic™ model is © 1992-2005 XJ Technologies www.anylogic.com



Mineral water and Tonic Production

Clean bottles are delivered from a bottle warehouse. Dirty bottles (reuse) are washed. Bottles are distributed between the two lines where they are filled with mineral water and tonic. Drinks are made by mixing of liquids from tanks. Bottles are marked, packed and sent to the warehouse. Forklift trucks then load boxes into arriving trucks according to orders received.

technologies
This AnyLogic™ model is © 1992-2005 XJ Technologies www.anylogic.com

Рис. 1. Примеры работы модели "Производство минеральной воды и тоника"

На складе (нижняя часть рис. 1) автомобили разгружаются слева на анимированной схеме склада 2-мя подъемно-разгрузочными машинами. Контейнеры с минеральной водой накапливаются в нижней части склада, а с тоником – в верхней. Еще одна подъемно-разгрузочная машина доставляет контейнеры на правую сторону склада, где они забираются автомобилями покупателей. Количество ежедневно закупаемых бутылок напитка также задается в модели (1600 штук).

Модель является прекрасной анимированной презентацией соответствующего производства. Она дает его руководителям простую для понимания и компактную информацию о состоянии всех процессов/элементов технологической цепочки в заданные моменты времени. Чтобы создать аналогичный уровень информированности традиционными таблицами и графиками потребовалось бы гораздо больше усилий как от руководителей, так и от аналитиков. Настраиваемы параметры модели (выполненные в виде ползунков) позволяют прямо по ходу ее работы анализировать последствия от изменения некоторых факторов. Например, выход из строя подъемно-разгрузочных машин, изменения в рецептуре напитков и т.п. Количество подобных настраиваемых параметров модели может быть при необходимости увеличено.

Модель "Отделение скорой помощи"

На рис. 2 приведены примеры работы модели, имитирующей функционирование отделения скорой помощи при крупной больнице, включая детальную статистику об использовании ресурсов отделения. Ссылка на работающую версию этой модели находится на странице http://www.xjtek.com/anylogic/demo_models/healthcare/ под названием **Emergency Department**. Полный исходный код данной модели включен в дистрибутив AnyLogic 5 (находится в разделе "Примеры" в подразделе "Healthcare"). В книге [Карпов Ю.Г] подробно описан процесс разработки упрощенной версии этой модели (стр. 280), а также история создания полной версии этой модели (стр. 354).

В работающем виде данная модель содержит те же основные элементы, что и в предыдущей модели. Однако здесь предусмотрено только два настраиваемых параметра (два ползунка): 1) количество больных, поступающих в отделение в единицу модельного времени (на примере оно равно 10 человек); 2) процент ходячих больных в их общем потоке.

Модель отделения скорой помощи имитирует обслуживание входного потока больных со случайным распределением у них видов травм и заболеваний имеющимися ресурсами отделения. Ресурсы отделения состоят из заданного количества специалистов разного вида (см. на рис. 2 список в столбце **Staff utilization** на нижней картинке **Model statistics**), количества специализированных кабинетов и рабочего времени специалистов.

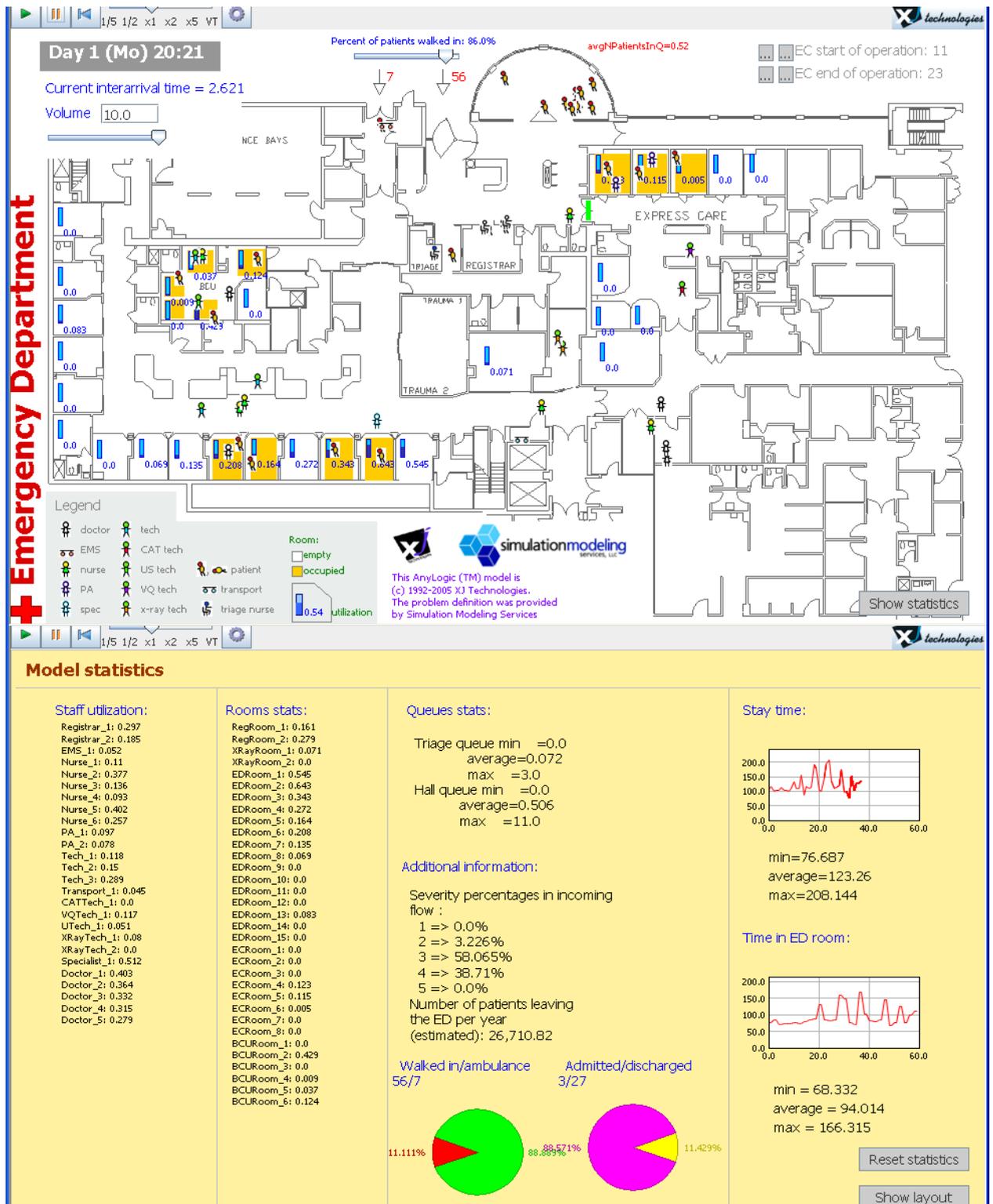


Рис. 2. Примеры работы модели "Отделение скорой помощи"

Дополнительным ограничением является организация пространства отделения, перемещение по которому больных и персонала требует времени, вызывая задержки в обслуживании больных, создавая дополнительные очереди и т.п. Для каждого поступающего больного в зависимости от вида его заболевания в модели назначается определенная схема обслуживания, реализация которой визуализируется на анимированной презентации в виде перемещения больного из кабинета в кабинет, в том

числе в сопровождении персонала отделения, ожидания в очередях когда освободится требуемый специалист или кабинет и т.п.

Сводная статистика (нижняя картинка рис. 2), в том числе, демонстрирует текущие показатели использования всех ресурсов отделения, среднее время нахождения больных в очередях, общее время, проведенное больными в отделении, включая время, проведенное в кабинетах и т.п.

Подобная компьютерная имитационная модель наглядно демонстрирует функционирование больших/сложных организационных систем, которое практически невозможно представить традиционными способами. Сложный организационный механизм предстает здесь в виде реалистичной картины изменения состояния элементов системы и связей между ними. Руководитель подобной организации может с помощью модели проанализировать фактические и/или возможные причины возникновения очередей в обслуживании и проимитировать доступные ему варианты улучшения ситуации. Возможен анализ различных сценариев развития событий и поиск наилучших решений (включая решение оптимизационных задач).

Такая модель может быть полезным информационно справочным ресурсом для пациентов, если она соединена с информационной системой организации и регулярно актуализируется на основе получаемых из нее реальных данных (занятость специалистов, длина очереди пациентов и др.). С помощью такой модели пациенты могут получать прогноз времени ожидания в очереди, оценки общего времени и требуемой им схемы обслуживания и т.п. Родственники больных могут просматривать аналогичную информацию через Интернет.

Модель "Глобальная конкуренция компаний по производству целлюлозы"

На рис. 3 приведен пример работы модели, имитирующей функционирование шести транснациональных компаний по производству целлюлозы (компании имеют по несколько предприятий, расположенных, в том числе, на разных материках). Модель имитирует конкуренцию на глобальном рынке целлюлозы, где преимущество имеют компании с меньшей себестоимостью продукции, зависящей от стоимости древесины на континентах, где располагаются их заводы. Ссылка на работающую версию этой модели находится на странице http://www.xjtek.com/anylogic/demo_models/marketplace_competition/ под названием **Pulp Companies Competition**. Полный исходный код данной модели включен в дистрибутив AnyLogic 5 (находится в разделе "Примеры" в подразделе "Marketplace and competition").

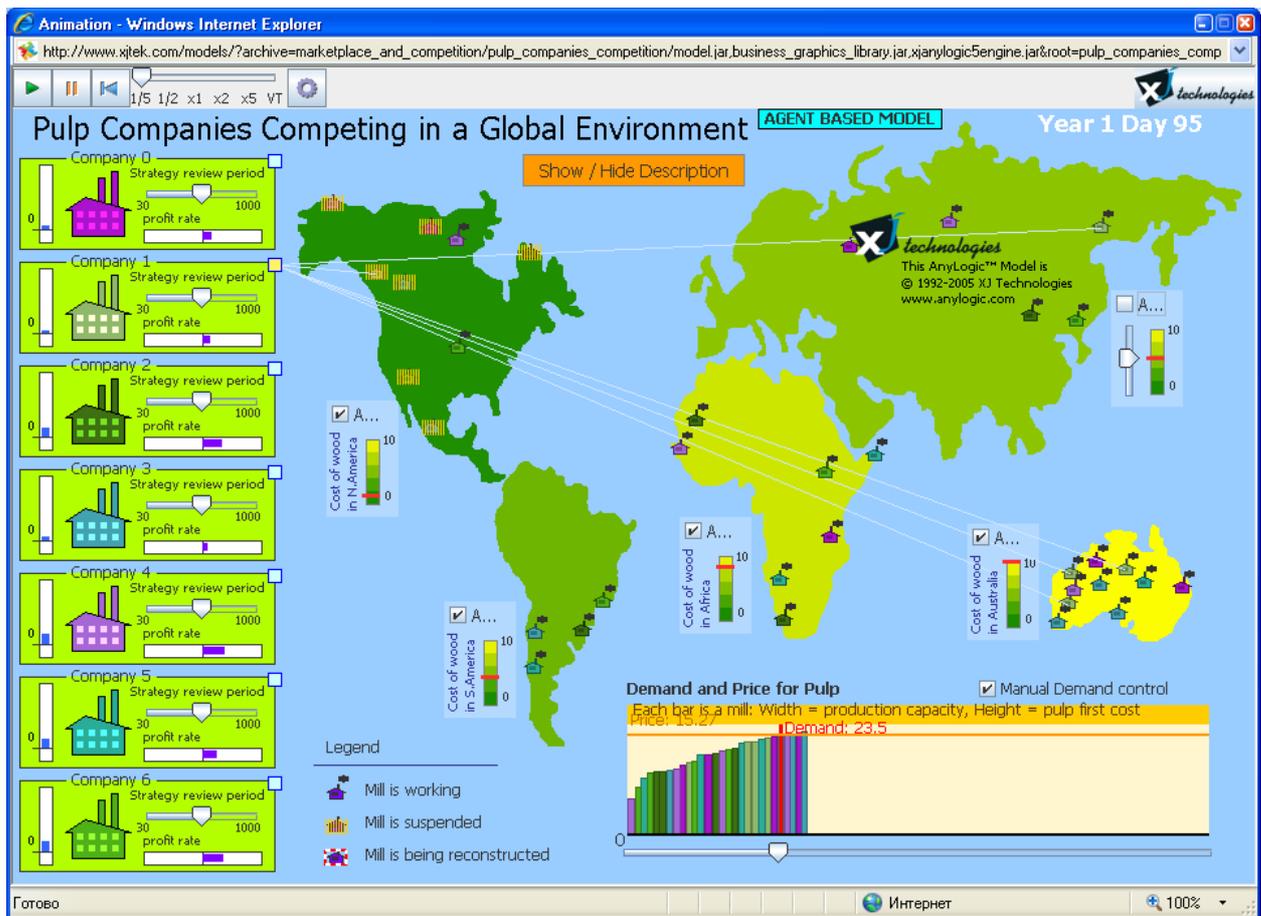


Рис. 3. Пример работы модели "Глобальная конкуренция компаний по производству целлюлозы"

Настраиваемые параметры модели включают:

- мировой спрос на целлюлозу, меняется ползунком внизу справа под гистограммой **Demand and Price for Pulp**;
- стоимость древесины на каждом континенте, текущий уровень которой отражает цветной/цифровой индикатор, расположенным рядом с каждым континентом (см. **Cost of wood in ...**); цвет континента соответствует текущей стоимости древесины, установленной на индикаторе, цветной индикатор превращается в ползунок и позволяет изменить стоимость древесины соответствующего континента, если снять чек-бокс у соответствующего индикатора (см. пример для индикатора евроазиатского континента);
- период времени, через который компания оценивает результаты своей работы и по итогам принимает решение об изменении статуса своих заводов (остановка, реконструкция или закрытие), значение меняется ползунком в окне соответствующей компании (см. **Strategy review period**), расположенным в левой части анимированной презентации модели.

Каждый отдельный завод представлен в модели параметрами мощности и технологического уровня. Себестоимость производимой заводом целлюлозы зависит от стоимости древесины на континенте, где завод расположен, и технологического уровня завода. Относительно текущей мировой цены целлюлозы завод может оказаться прибыльным или нет.

Мировая цена целлюлозы устанавливается в модели на уровне ее себестоимости на замыкающем заводе (заводы упорядочены по возрастанию себестоимости), продукция которого еще требуется для удовлетворения мирового спроса на целлюлозу. Замыкающий завод имеет нулевую прибыльность. На гистограмме **Demand and Price for Pulp** (внизу справа на рис. 3) слева от красной линии, обозначающей установленный уровень мирового спроса на целлюлозу, находятся прибыльные заводы, а справа – убыточные.

По умолчанию в модели параметры "мировой спрос на целлюлозу" и "стоимость древесины" на континентах меняется по синусоиде, при условии, что эти параметры не меняются вручную через соответствующие ползунки.

Все шесть компаний реализуют в модели одинаковую стратегию:

- если работающий завод становится неприбыльным, то он останавливается;
- если остановленный завод может стать прибыльным, он возобновляет работу, иначе он реконструируется;
- несколько раз реконструированные заводы, если они не стали прибыльными, закрываются;
- если мировой спрос на целлюлозу не покрывается, а компания не слишком велика (ее количество заводов меньше установленного в модели лимита), то она создает новые заводы в регионах с самой дешевой древесиной.

Подобная имитационная модель является примером описания поведения независимых участников с конфликтом интересов (выигрыш одних означает проигрыш других). В случае равенства возможностей участников оптимальной стратегией их поведения становится необходимость договариваться и согласовывать свои действия. Модель создает условия для координации действий между участниками и может быть инструментом, облегчающим поддержание данной системы независимых действующих лиц в скоординированном состоянии.

Модель "Производство пенобетона"

На рис. 4-5 приведены примеры работы модели, имитирующей технологическую линию по производству пенобетона. Данная модель в отличие от предыдущих не имеет открытой исполняемой версии и не входит в дистрибутив **AnyLogic**. Эта модель разработана компанией **XJ Technologies** с помощью системы моделирования **AnyLogic** по заказу **СЕТ холдинга**. Мы приводим ниже примеры работы модели и ее описание с разрешения **СЕТ холдинга**, являющегося владельцем данной имитационной модели.

Имитационная компьютерная модель производства пенобетона была создана для решения практической задачи: построенный СЕТ холдингом в Орловской области цех по производству пенобетона ни как не мог выйти на расчетную мощность. Руководители цеха объясняли это новизной, сложностью и неотработанностью технологии производства пенобетона. Для анализа данной ситуации, прояснения роли "человеческого фактора" в возникновении проблем с производством пенобетона, а также достижения лучшего взаимопонимания между руководителями завода и руководством СЕТ холдинга по мерам для исправления ситуации была создана компьютерная имитационная модель данного производства.

Модель имитирует с высокой точностью весь технологический процесс. Он начинается с подготовки бетонной смеси (помольное отделение слева на рис. 4) из имеющихся в наличии запасов сырья. Затем смесь разливается бетоновозной тележкой по формам (на рис 4. видно 20 форм в виде серых прямоугольников внизу картинки, из которых одна

форма в данный момент пустая). Пространственная структура автоклавного цеха (в центре на рис. 4) близка к реальной. Структура помольного цеха не важна, поэтому он отображен в виде блока с индикаторами запасов сырья. На схеме цеха отражаются все происходящие производственные процессы, а именно: заливка форм, движение тележек и кранов, перемещение рабочих и пенобетонных блоков, открытие и закрытие автоклавов, резка, деление и т.д.

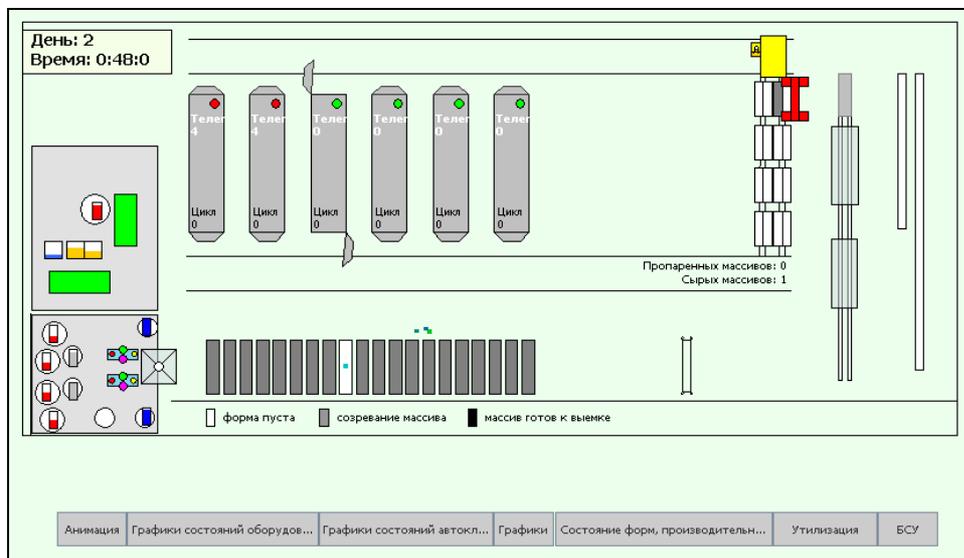


Рис. 4. Пример работы модели "Производство пенобетона"

Настраиваемые параметры модели позволяют менять количество форм для заливки смеси, количество автоклавов созревания массивов, а также имитировать различные виды поломок и внештатных ситуаций, которые могут возникать на данном производстве. Возможная для имитации структура внештатных ситуаций и выдаваемые моделью данные для анализа иллюстрируются ниже.

Помольное отделение представлено на анимации модели блоком с набором индикаторов (см. данный фрагмент на рис. 5):

1. индикатор уровня заполненности расходного бункера извести;
2. индикатор уровня заполненности расходного бункера песка (для мельницы мокрого помола);
3. индикатор уровня заполненности второго расходного бункера песка (для мельницы сухого помола);
4. индикатор уровня заполненности хранилища шлама;
5. индикатор работы мельницы мокрого помола (зеленый – работает, красный – не работает);
6. индикатор работы мельницы сухого помола (зеленый – работает, красный – не работает).

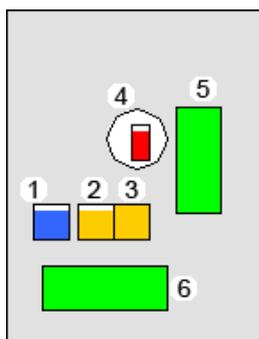


Рис 5. Индикаторы помольного отделения

В цехе имеются расходные бункеры шлама, цемента и вяжущей смеси. Уровни заполненности этих бункеров отражены индикаторами, расположенными на рис. 4 ниже индикаторов помольного отделения.

Созревшие массивы, прошедшие резку и ждущие очереди на постановку в автоклав, а также массивы, пропаренные в автоклавах и ждущие очереди на деление, складироваются в определенном месте. На анимации модели это выглядит следующим образом:

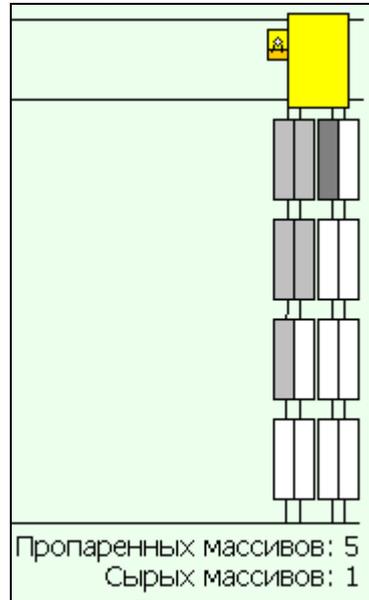


Рис. 6. Складирование массивов

Светло-серые блоки обозначают пропаренные массивы, а темно-серые – еще не пропаренные массивы, прошедшие резку. Внизу отражено количество массивов обоих типов.

Автоклавы имеют ряд индикаторов, отражающих их состояние (см. рис. 7):

- количество телег – эта цифра отражает количество пар пенобетонных блоков, находящихся в автоклаве;
- цикл – отражает количество циклов пропаривания, совершенных этим автоклавом;
- круглый индикатор, имеющий два цвета, отражает состояние автоклава. Красный цвет означает, что автоклав находится в процессе цикла пропаривания. Зеленый индикатор означает, что автоклав пропариванием не занят;
- красный прямоугольник означает поломку автоклава.

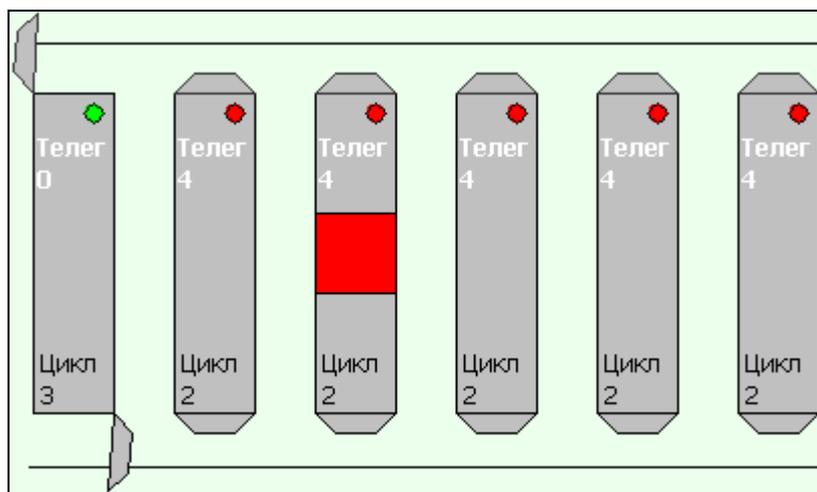


Рис. 7. Индикаторы автоклавов

Модель имеет отдельный раздел «Графики состояния оборудования» (см. кнопку, открывающую этот раздел, на рис. 4 внизу). Этот раздел позволяет отследить временную динамику изменения фаз работы оборудования (рис. 8).

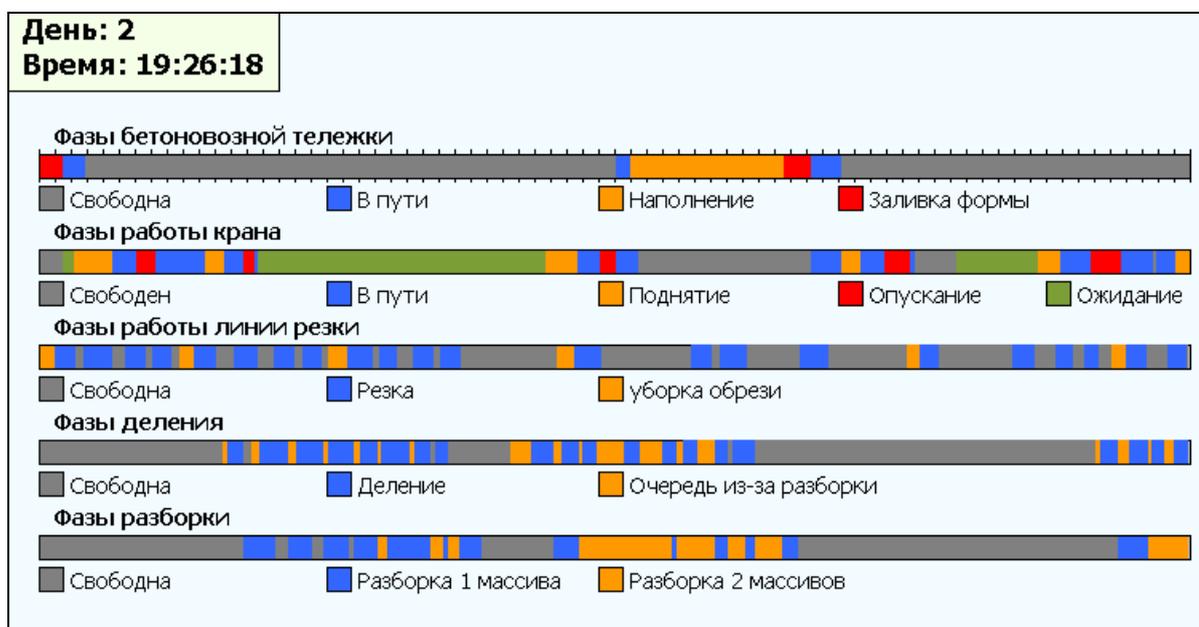


Рис. 8. Графики состояния оборудования

Графики фаз демонстрируют последовательности действий, совершаемых оборудованием. Например, на графике фаз работы крана типичной является последовательность «Свободен» → «В пути» → «Поднятие» → «В пути» → «Опускание» → «В пути» → «Свободен». Кроме того, по графикам состояний оборудования можно визуально оценить соотношение времени, когда оборудование совершает полезную работу и времени простоя.

Данные из еще одного раздела модели «Графики состояния автоклавов» по смыслу аналогичны графикам состояния оборудования. На рис. 9 три последних автоклава неактивны, так как имитация запущена с шестью автоклавами.

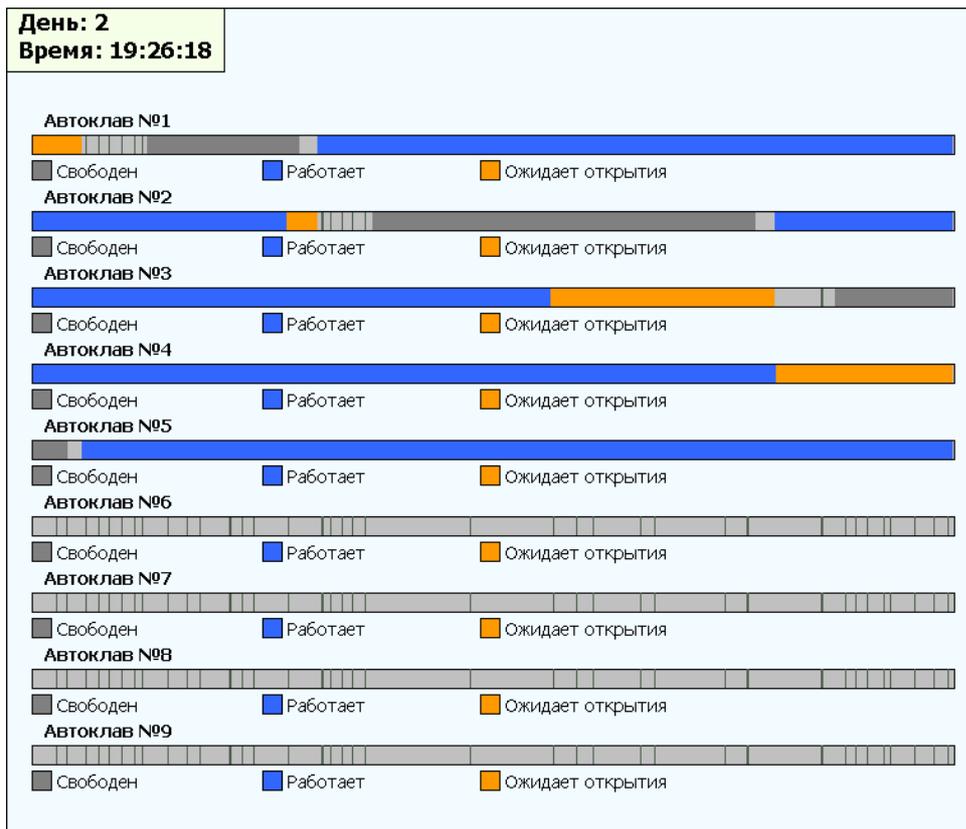


Рис. 9 Графики состояния автоклавов

Модель также позволяет посмотреть графики различных параметров работы предприятия, показывающих степень использования ресурсов (занятость резчиков и формовщиков, величину очереди на деление и количество используемых поддонов), статистика каждого дня о количестве готовых массивов (поделенных и разобранных) а также состояние каждой из форм для заливки и общее количество свободных форм. С помощью данных графиков можно следить за динамикой производительности и полнотой использования форм.

В разделе модели "утилизация" представлены круговые диаграммы, отражающие степень утилизации машин и аппаратов производства, таких как резка, делительная установка, передаточный мост, кран, тележка (рис. 10).

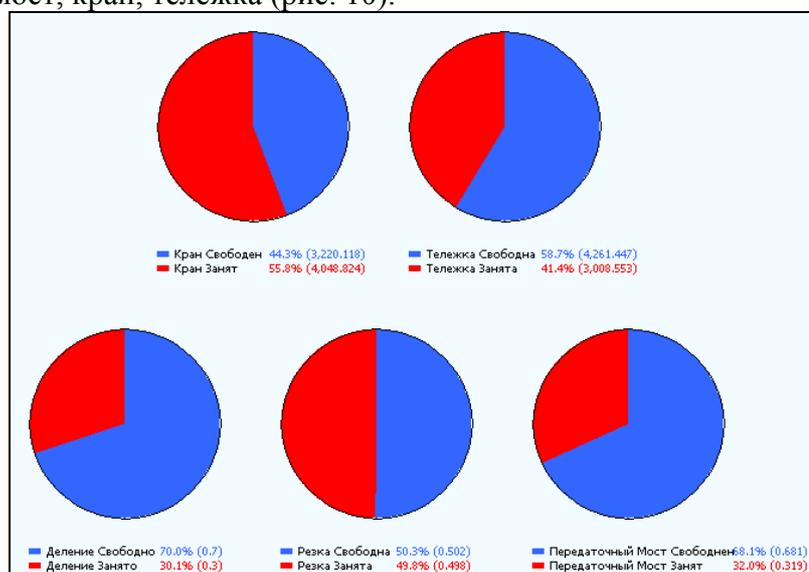


Рис. 10. Уровень загрузки машин и аппаратов

Все данные о временных характеристиках производственных процессов (длительностях тех или иных операций) хранятся в базе данных и могут меняться при необходимости. База хранит, например, данные хронометража производственных процессов (результаты измерений длительности операций в минутах). Для каждого из типов операций, как правило, присутствует несколько результатов измерений. Необходимое для вычислений в модели значение рассчитывается с помощью нормального случайного распределения. Если же для какого-либо типа операции задано только одно временное значение, то оно и будет использоваться для вычислений.

Описанная выше модель производства пенобетона представляет собой реальный пример применения компьютерного имитационного моделирования для анализа проблем и принятия решений в сложных технологическо-организационных системах. Она признана работниками цеха как точный инструмент имитации работы цеха и для прогноза изменений. Данная модель дает руководителю существенно легче воспринимаемую, по сравнению с традиционными таблицами/графиками, оперативную картину функционирования цеха, возможность анализа развития событий при различных поломках и внештатных ситуациях. В силу своей точности модель может служить эталоном работы цеха, определяя норму производственных процессов, по сравнению с которой удобно фиксировать отклонения и разбираться в их причинах.

Дополнительные публикации о современном прикладном имитационном моделировании смотри, например, на сайте <http://www.xjtek.com/support/download/papers/>

Научное имитационное моделирование

Имитационное компьютерное моделирование давно и активно используется для научных исследований свойств и особенностей поведения социально-экономических систем. Отражением результативности этого подхода является выделение в последние годы в составе различных общественных научных дисциплин самостоятельных направлений типа "вычислительная экономика" (computational economics¹), "вычислительная социология" (computational sociology²) и т.п.

Современное направление развития имитационного моделирования в общественных науках в существенной степени выглядит как формирование агентной подходов к представлению поведения социально-экономических систем и создание соответствующих моделирующих комплексов. Уже стало достаточно популярным новое научное направление "Agent-based Computational Economics" (ACE)³, развивающее методологию компьютерных модельных исследований экономических процессов в виде динамических систем взаимодействующих агентов.

В статье [Robert Axelrod, Leigh Tesfatsion] выделяются четыре основные цели применения ACE в научных исследованиях:

1) эмпирическое изучение поведения систем и процессов социально-экономического регулирования (макро уровень), возникающих в результате специфической деятельности большого количества агентов с собственным поведением на микро уровне;

¹ http://en.wikipedia.org/wiki/Computational_economics

² http://en.wikipedia.org/wiki/Computational_sociology

³ <http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/ace.htm>

2) нормативное изучение функционирования искусственных социально-экономических систем путем компьютерных имитаций, представляющее собой один из элементов современного организационного и институционального дизайна для конструирования социально-экономических систем с заранее заданными свойствами;

3) качественный анализ и теоретическое обобщение процессов самоорганизации социально-экономических систем;

4) развитие методологии и научного инструментария для исследования социально-экономических систем и процессов развития в современных условиях.

Для получения систематической картины о научных приложениях имитационного моделирования рекомендуем познакомиться со статьей [Axelrod, R.; Tesfatsion, L.], в которой приведен обширный список публикаций и источников, иллюстрирующих разнообразие форм и приложений агентного имитационного моделирования в общественных науках и в экономике в частности. Список источников разбит на группы по следующим темам:

- Complexity and ABM (сложные системы и агентное моделирование)
- Emergence of Collective Behavior (возникновение коллективного поведения)
- Evolution (эволюция)
- Learning (обучение)
- Norms (нормы)
- Markets (рынки)
- Institutional Design (институциональный дизайн)
- Networks (сети)
- Modeling Techniques (подходы к моделированию).

Дополнительные сведения на русском языке о современных особенностях применения компьютерного имитационного моделирования в научных исследованиях⁴ в духе АСЕ языке можно получить в публикациях [Макаров В.Л., Бахтизин А.Р.], [Тухвебер С.М., Редько В.Г.], [Паринов С.И.] и др.

Ниже описаны инновации, произошедшие в последние годы в методическом и программном инструментарии для имитационного моделирования, которые открыли новые возможности как для прикладного моделирования, так и для его использования в научных исследованиях.

Новые подходы и инструменты имитационного моделирования

Современное компьютерное имитационное моделирование социально-экономических систем и процессов представляет собой комбинация трех⁵ основных методических подходов: 1) системная динамика, 2) дискретно-событийное и 3) агентное моделирование. В статье [Борщев А.] приведены диаграммы, иллюстрирующие особенности этих подходов (рис. 11-13).

⁴ Рекомендуется познакомиться с публикациями в журнале Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASSS) (<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/>) полностью посвященному этой проблематике

⁵ В литературе (см. например, [Борщев А.]) упоминается еще 4-й подход: динамические системы, который, на наш взгляд, мало применим в социально-экономических задачах.

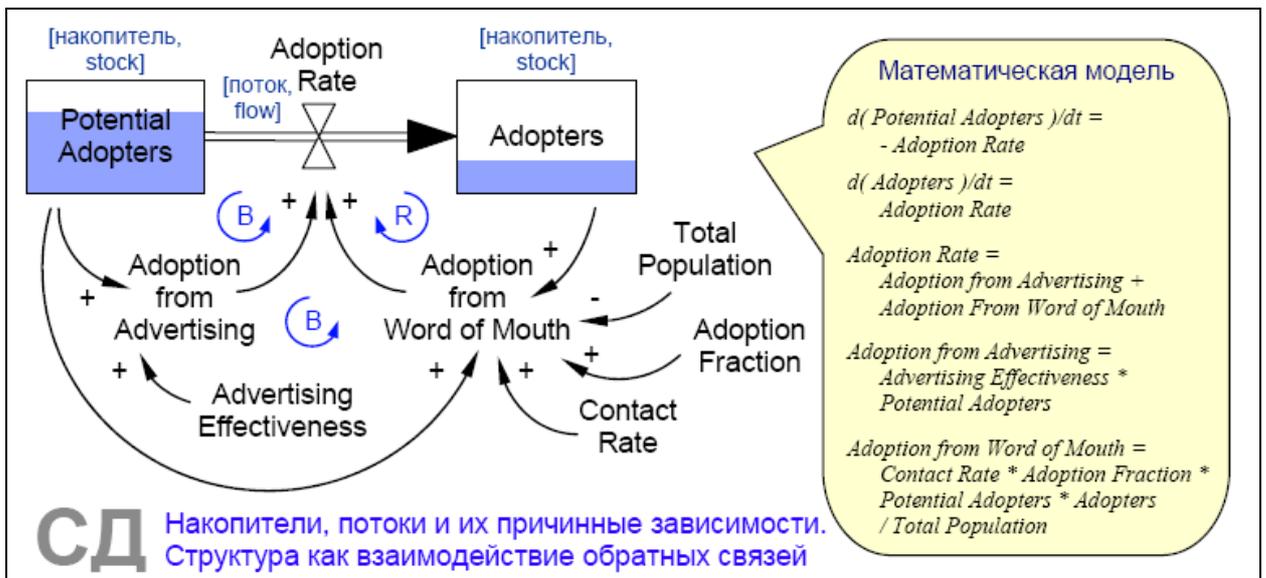


Рис. 11. Пример структуры модели системной динамики (источник [Борщев А., стр. 5])

Особенностью первого подхода (системная динамика) является представление описываемых социально-экономических явлений в терминах "потоков" и "запасов" и их приращений. Модели такого типа хорошо известны в экономической науке, например, модель "Мировая динамика" Джей Форрестера. "Моделируя в стиле СД (системная динамика), вы представляете структуру и поведение системы как множество взаимодействующих положительных и отрицательных обратных связей и задержек" [Борщев А., стр. 5], что и проиллюстрировано на рис. 11.

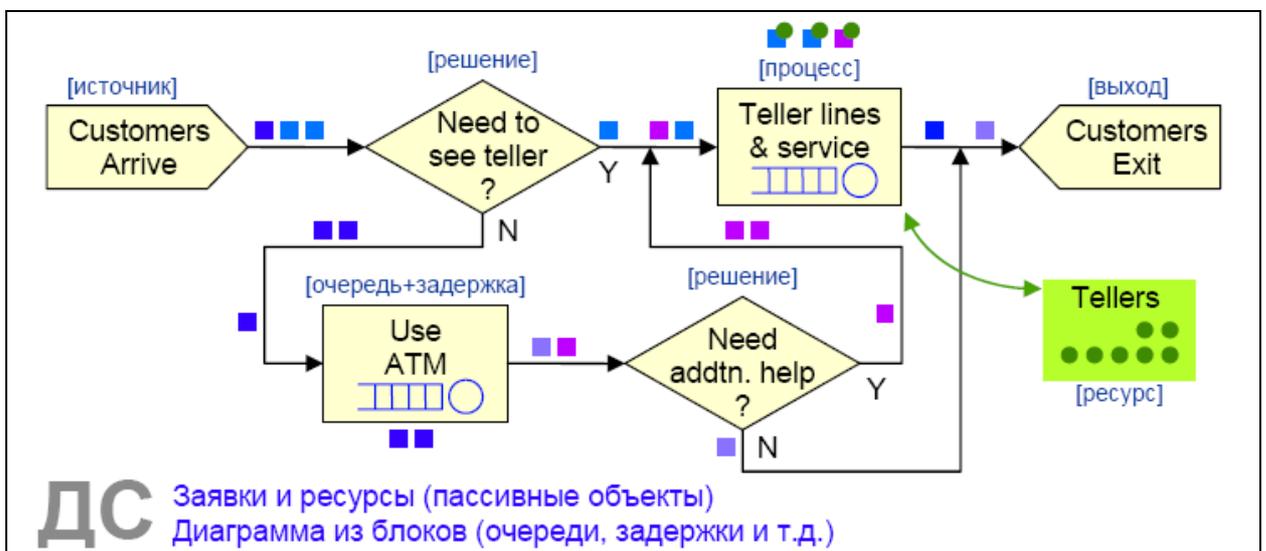


Рис. 12. Пример структуры дискретно-событийной модели (источник [Борщев А., стр. 7])

Дискретно-событийное (ДС) моделирование описано в [Борщев А., стр. 7] следующим образом: заявки (entities) – пассивные объекты, представляющие людей, детали, документы, задачи, сообщения и т.п. - путешествуют через потоковые диаграммы (flowchart), стоят в очередях, обрабатываются, захватывают и освобождают ресурсы, разделяются, соединяются и т.д. Типичная потоковая диаграмма показана на рис 12.

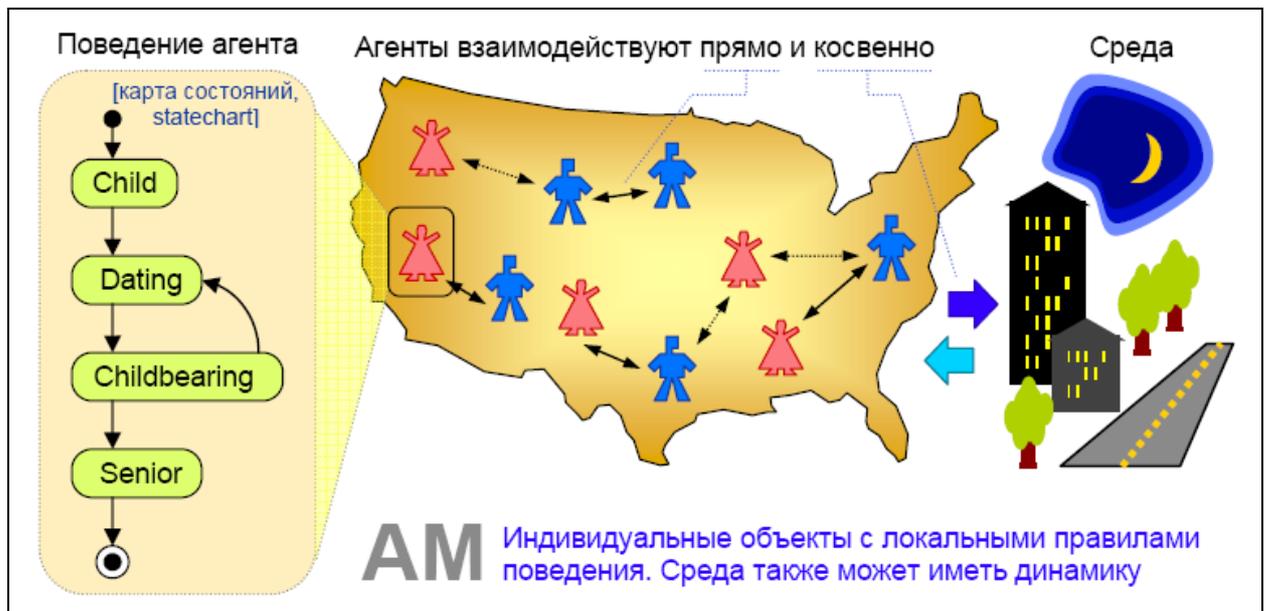


Рис. 13. Пример структуры агентной модели (источник [Борщев А., стр. 8])

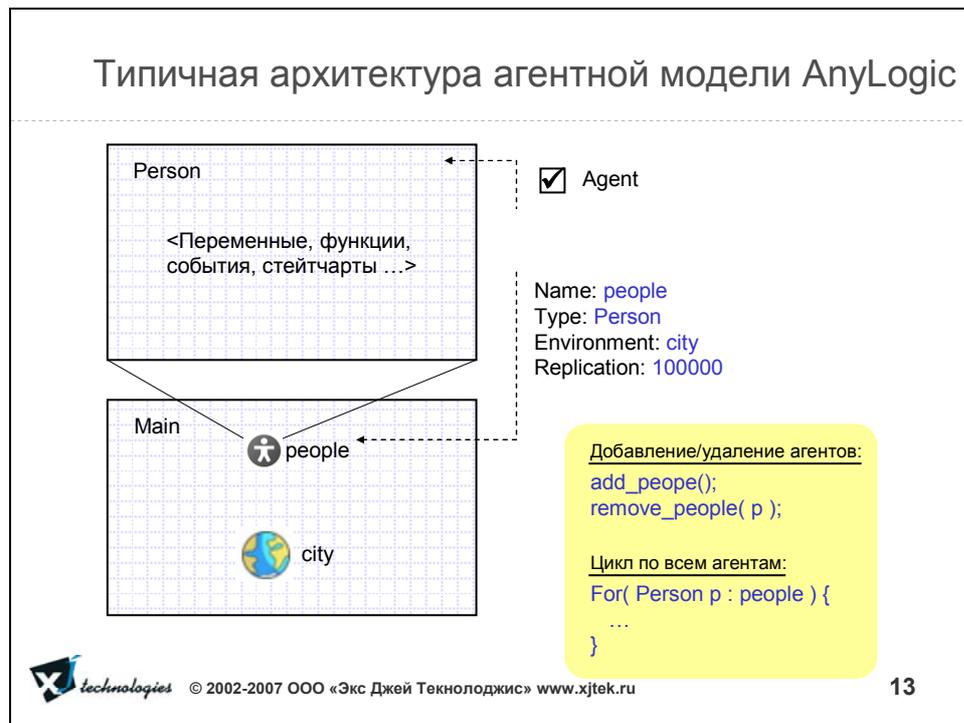
Агентное моделирование (АМ) состоит в задании множества (оно может быть очень большим) относительно самостоятельных модельных сущностей – агентов, которые влияют своим поведением друг на друга и внешнюю среду, а также среда оказывает на них свое воздействие. Правил поведения агентов определяются на индивидуальном уровне (см. на рис. 13 слева карту состояний в подмодели агента), а глобальное поведение модели в целом возникает как результат деятельности многих (десятков, сотен, тысяч, миллионов) агентов, каждый из которых следует своим собственным правилам, "живёт" в общей среде и взаимодействует со средой и с другими агентами [Борщев А., стр. 8]. Рис. 13 иллюстрирует это.

Агентный подход является в определенном смысле самым общим, по отношению к первым двум, т.к. он позволяет реализовывать все остальные подходы внутри себя (см. выше диаграммы 1-2). Агентная модель может включать в себя разнокачественные объекты, при моделировании которых могут применяться методы системной динамики, дискретно-событийный подход, оптимизация и другое.

На практике возможность использовать комбинированные подходы для построения имитационных моделей полностью определяется функциональностью выбранного пакета для моделирования.

Некоторые пакеты для имитационного моделирования являются узко специализированными, например, только для агентного моделирования (RePast). При этом они могут обладать достаточно развитой конструктивной базой, но не позволяют комбинировать в модели разные подходы имитационного моделирования. Пакет **AnyLogic 6** не является узкоспециализированным для агентного моделирования. И поэтому может в чем-то проигрывать по составу конструктивных элементов другим пакетам, но значительно выигрывает за счет возможностей комбинирования подходов.

Типичная архитектура агентной модели, которая может быть построены на базе **AnyLogic 6**, представлена на диаг. 3. Подробнее это описано ниже в следующем разделе.



Диagr. 3. Схема модельной реализации агента в AnyLogic 6

Перечисленные подходы в том или ином наборе лежат в основе достаточно большого количества программных моделирующих комплектов. Перечень пакетов для имитационного моделирования можно найти на странице <http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/accode.htm>. Одним из первых в списке на этой странице упоминается пакет **AnyLogic**.

Возможности AnyLogic

Поскольку определенные аспекты пакета **AnyLogic** достаточно подробно описываются в следующих разделах, здесь мы приводим его краткое общее описание, заимствованное из англоязычной инструкции к **AnyLogic 6**. Дополнительные общие сведения об истории создания **AnyLogic** и др. можно получить из статьи [Борщев А., стр. 18].

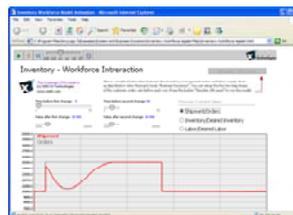
Некоторые достоинства **AnyLogic** уже были выше проиллюстрированы: модели на рис. 1-10 созданы с помощью именно этого пакета, было также упомянуто о возможностях комбинированного применения трех основных подходов современного имитационного моделирования и др.

Кроме этого пакет позволяет создавать очень сложные двумерные визуальные презентации работы модели, используя объектную структуру самой модели (см. примеры модельных презентаций на рис. 1-4). Презентации конструируются из имеющегося набора фигур (круг, прямоугольник, линия и т.п.) и функций для управления ими. Каждая фигура имеет настраиваемые параметры для определения ее визуального представления (расположение, ширина и высота, цвет и т.п.) в презентации.

Анимация моделей. Апплеты

- Вы можете создавать достаточно сложные внешние интерфейсы для Ваших моделей
 - Интерактивные диаграммы бизнес-графики (в т.ч. нестандартные)
 - Возможность переключения между несколькими видами
 - Элементы управления (бегунки, кнопки, флажки, и т.д.), с помощью которых можно инициализировать, запускать, приостанавливать и перезапускать модель
- Полнофункциональные модели могут запускаться как апплеты
 - Это позволяет напрямую доставлять модели даже удаленным клиентам!

Это не AnyLogic, а MS Internet Explorer!



© 2002-2007 ООО «Экс Джей Текнолоджис» www.xjtek.ru

20

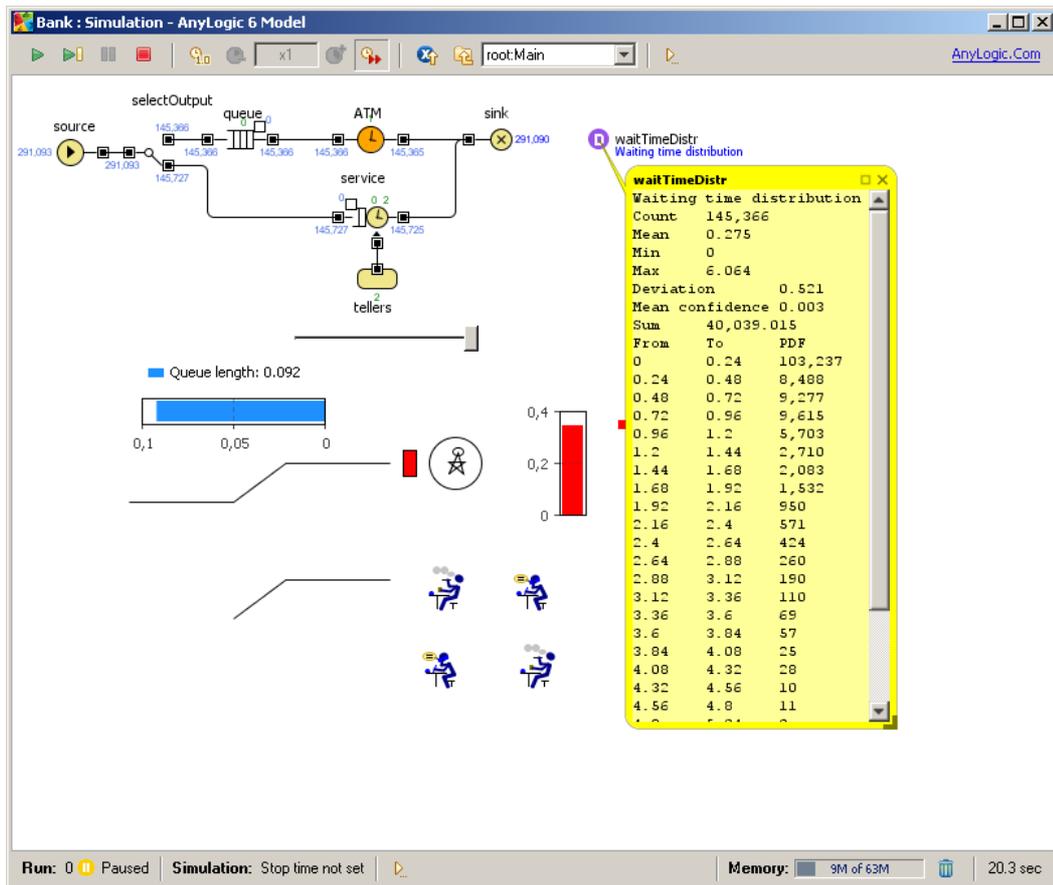
Диал. 4. Возможности интерфейсов моделей, созданных на AnyLogic

Модельные презентации могут быть анимированными (см. диал. 4). Для этого все фигуры имеют среди настраиваемых параметров динамические опции, которые позволяют установить связь между визуальным представлением фигуры и текущими значениями определенных переменных модели. Таким образом, презентация будет отображать как меняются в ходе имитации те или иные объекты модели и их состояния. Примеры анимированных модельных презентаций можно увидеть, если запустить исполняемые коды моделей, приведенные в описании первых трех моделей в разделе "Прикладное имитационное моделирование".

Модельные презентации могут быть сделаны интерактивными (см. в моделях на рис. 1-4 встроенные меню для изменения параметров модели прямо во время их работы), поскольку **AnyLogic** предлагает широкий спектр управляющих элементов (кнопки, ввод текста, чек-боксы, ползунки и т.п., см. диал. 4). С их помощью переменные и параметры модели могут меняться прямо по ходу имитации.

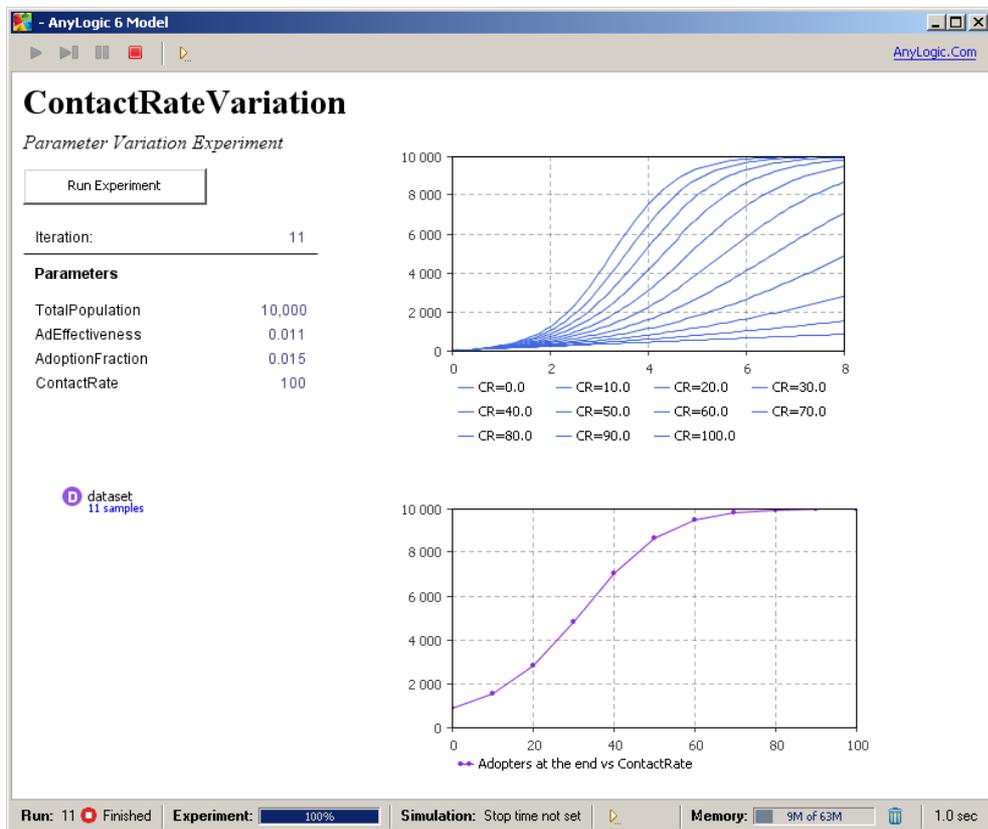
Модельные презентации могут быть многоуровневыми (иметь иерархию), передающими иерархию объектов модели. Презентации представляют собой набор модулей, создаваемых для каждого объекта модели отдельно (например, на рис. 1 представлены модули "технологическая линия", "склад готовой продукции", "контейнер с бутылками", "подъемно-разгрузочная машина" и др.). Такие модули для объектов нижнего уровня могут быть включены в презентации объектов более высокого уровня иерархии. В **AnyLogic** осуществляется контроль за надлежащей сборкой модулей в рамках визуальной картины модели, включая расположение и трансформацию всех элементов презентаций.

В **AnyLogic** имеются развитые средства визуализации результатов работы модели, кроме встроенной графики. На диал. 5. представлена графическая диаграмма модели, в которой видно как выводятся текущие значения всех ее параметров и переменных, а также пример окна "инспекта", которое может быть открыто для просмотра состояния текущего объекта модели.



Диэг. 5. Пример вывода текущих состояний переменных и параметров модели

Данный пакет имеет встроенные средства статистического анализа модели. На диэг. 6 показан пример вывода статистического эксперимента для одной из моделей.



Диэг. 6. Пример статистического эксперимента с параметрами модели

Заключение

Методические и инструментальные достижения последних лет в компьютерном имитационном моделировании впервые создают возможности для описания и изучения сложных социально-экономических систем без необходимости их существенного упрощения.

В статье проиллюстрированы выгоды от этих инноваций в приложении к практическим задачам анализа и управления сложных бизнес систем.

В применении данных модельных инноваций к научным исследованиям одной из наиболее перспективных, на наш взгляд, является тема исследования социально-экономического потенциала организационных структур. Возможности современного агентного моделирования позволяют представить большие и сложно организованные социальные системы как сети большого количества взаимодействующих самостоятельных агентов, ведущих совместную социально-экономическую деятельность. Появляется возможность спецификации сетевых параметров и определения механизма их влияния на состояние и характеристики функционирования социально-экономической системы. Это в свою очередь позволяет формализовать схему анализа социально-экономического потенциала организационных структур с точки зрения влияния сетевых параметров системы. Появляется возможность анализа сценариев и факторов социально-экономического развития, а также повышения общественной эффективности за счет варьирования сетевыми параметрами.

Литература

Axelrod, Robert; Tesfatsion, Leigh. On-Line Guide for Newcomers to Agent-Based Modeling in the Social Sciences. <http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/abmread.htm>

Tesfatsion, Leigh. Agent-Based Computational Economics. <http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/ace.htm>

Борщёв Андрей. От системной динамики и традиционного ИМ — к практическим агентным моделям: причины, технология, инструменты. <http://www.gpss.ru/paper/borshevarc.pdf>

Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006.

Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. Компьютерное моделирование искусственных миров <http://scmai.miem.edu.ru/S/s2.htm>

Паринов С.И. К теории сетевой экономики. Новосибирск, ИЭОПП СО РАН, 2002, глава 4, <http://socionet.ru/RuPEc/xml/rus/book-ieieli/rusieieli97421.xml>

Тухвебер С.М., Редько В.Г. Модели эволюции многоагентных экономических систем в информационном сообществе http://www.keldysh.ru/papers/2005/prep22/prep2005_22.html