

## ИНФОРМАТИКА ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 519.86

### Исследование перспектив применения программных сред имитационного моделирования при разработке и оптимизации производств машиностроения

**М. В. Жаров**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский авиационный институт" (национальный исследовательский университет) РФ  
Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4  
MaximZharov@mail.ru

Представлены результаты исследования рынка прикладных программ имитационного моделирования с точки зрения возможности и целесообразности использования последних при разработке или оптимизации технологических процессов на предприятиях отечественного машиностроения. Анализируются особенности технологических процессов машиностроения и авиастроения на отечественных предприятиях. Изучаются особенности производства металлоемких изделий и полуфабрикатов с точки зрения целесообразности имитационного моделирования данных процессов. Определяется целесообразность проведения имитационного моделирования производств машиностроения, что обеспечивает адекватные результаты анализа при минимальных затратах по сравнению с другими методами моделирования. Определяются основные критерии для выбора конкретной имитационной программной.

**Ключевые слова:** технологии машиностроения; металлоемкое производство; авиастроение; деформационная обработка металлов и сплавов; литейное производство; производительность оборудования; оптимальные запасы полуфабрикатов; страховые запасы; имитационное моделирование; визуализация; дискретно-событийные подходы в моделировании; критерии выбора имитационных сред.

DOI: 10.17072/1993-0550-2021-3-58-67

#### Введение

При проектировании технологических процессов изготовления металлоемкой продукции перед технологами стоит необходимость учета множества переменных величин, которые определяют не только особенности самих технологических процессов, но и различные экономические параметры производства. При разработке новых технологических процессов или при оптимизации действующих производств должна рассматриваться не

только оптимальность маршрутов материальных потоков, не только определяться правильность расстановки основного технологического оборудования, вспомогательных и транспортных устройств, но должны определяться такие параметры, как подбор оборудования оптимальной производительности, обеспечение высокой загруженности всех видов оборудования в процессе эксплуатации последних, оптимальное количество изделий в партии, своевременность поставки (доставки) материалов и комплектующих к каждому рабочему месту, размеры производственных и страховых запасов перед каждой операцией и т.д.

Произвести математические расчеты с таким большим количеством переменных величин довольно сложно, а в ряде случаев практически невозможно. Поэтому в области исследования сложных процессов и систем с большим количеством переменных стало востребовано имитационное моделирование. Можно утверждать, что за последние 20 лет имитационное моделирование приобрело статус самого распространенного инструмента для реализации подобного рода расчетов и исследований. В настоящее время на отечественном рынке программного обеспечения для имитации предлагается более 50 мощных программных средств имитационного моделирования. Всего же на рынке информационных технологий фигурирует около 150 программных продуктов, позволяющих проводить имитационные эксперименты [1].

Известно, что имитационное моделирование подразумевает под собой замену какого-либо явления, процесса или объекта его математической моделью. Дальнейшие операции в рамках имитационного моделирования производятся именно с математической моделью. По своей сути имитационное моделирование представляет собой метод исследования объекта, явления или процесса, при котором изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью, описывающей реальную систему и с которой проводятся эксперименты с целью получения информации об этой системе [2, 3].

Каждая имитационная среда как прикладная программа должна обеспечивать возможность подробного описания любого объекта или явления.

С точки зрения организации производственного процесса применение имитационного моделирования позволяет сразу решить несколько вопросов. И в первую очередь это решение вопросов оптимизации производственной логистики, т.е. разработка системы оптимального, согласованного по производительности оборудования, внутрицехового перемещения деталей, заготовок или полуфабрикатов, определение уровня производственных запасов перед каждой операцией технологического производства и т.д.

Применение имитационного моделирования обладает целым рядом неоспоримых преимуществ:

- можно проводить исследования по различным производственным, управленче-

ским, организационным проектам довольно быстро и не используя никакие материальные ресурсы для реализации проводимых исследований;

- можно рассмотреть, как текущее поведение моделируемой системы, так и поведение в ее динамическом развитии в определенном интервале времени (за день, год и т. д.), что позволит оценить перспективы развития системы;

- легко и оперативно можно рассмотреть многовариантность производственных условий, определить наиболее уязвимые "узкие места" (снижение коэффициента загрузки оборудования, места снижения производительности, определить простои оборудования и др.);

- ответить на все вопросы организации производства, которые начинаются с фразы "что, если" [4, 5].

### **Особенности производств металлоемкой продукции**

Рассматривая технологические процессы изготовления материалоемкой продукции машиностроения можно выявить ряд особенностей:

- в процессе производства используется довольно мощное, энергоемкое и дорогостоящее производственное оборудование (литейное оборудование, деформационное оборудование (прокатные станы, молота, горячештамповочные кривошипные прессы, листогибочные прессы, гидравлические прессы и т.д.), которые характеризуются различными принципами работы, различной интенсивностью (скоростью хода) и разной производительностью;

- в подавляющем большинстве случаев технологический процесс производства материалоемкого изделия характеризуется набором ряда последовательных технологических операций, на которых используются различные виды оборудования, характеризующиеся различной, иногда кардинально отличающейся производительностью, и соответственно, на двух последовательных операциях требуется различное время на обработку полуфабриката (штучно-калькуляционная норма выполнения операции);

- при использовании горячей деформационной обработки в качестве вспомогательного оборудования необходимо применение печей или различных нагревательных

устройств; следовательно, целесообразно проводить работы по обеспечению сбалансированности производительности вспомогательного печного и основного деформационного оборудования;

- с учетом большого веса обрабатываемых заготовок и полуфабрикатов обязательно требуется применение средств механизации (робототехника, вспомогательные транспортные устройства, манипуляторы и т.д.), которые могут обрабатывать одновременно как один, так и несколько единиц основного технологического оборудования [6].

Следовательно, для оптимизации технологических процессов, для определения величин производственных запасов и обеспечения сбалансированности производительности основного технологического оборудования, с целью уменьшения времени ожидания обработки целесообразно проводить предварительные работы по моделированию проектируемых производственных систем.

Кроме того, большое влияние при анализе и построении технологического процесса оказывает серийность производства. В том случае, если изготовление детали идет в условиях массового, крупносерийного и серийного производства любые изменения в схему технологического процесса и маршруты движения полуфабрикатов в цехе производятся только в случае усовершенствования технологии или при приобретении и установке нового оборудования и, как правило, не более одного-двух раз в год. Данные производства не требуют дополнительных работ по моделированию производственной среды с применением программных средств для математического моделирования.

В случае реализации производства в условиях мелкосерийного или единичного производства переналадка оборудования, смена ассортимента, изменение маршрутов движения полуфабрикатов в зависимости от условий производства может проводиться до 15 раз в год.

Анализируя технологические производства по изготовлению металлоемких изделий авиастроительной отрасли на основе анализа производственного процесса на таких предприятиях отрасли, как АО "Авиастар-СП" (г. Ульяновск), ФГУП "НПЦ газотурбостроения "Салют" (г. Москва), АО "ВАСО" (г. Воронеж), АО "ОКБ Сухого" (г. Москва), и др., можно отметить ряд особенностей:

- все производства по изготовлению металлоемкой продукции авиастроения в основном представляют собой синтез технологий металлургического производства (литейное производство, обработка металлов давлением) и последующей механической обработки полученных полуфабрикатов;

- поточное массовое производство отсутствует на всех предприятиях авиастроения; давая оценку серийности исследуемого производства целесообразно говорить о мелкосерийном или среднесерийном производстве;

- как правило, даже несмотря на серийность производства, довольно часто происходит смена производимой продукции на каждой конкретной единице технологического оборудования;

- отсутствует нормирование производственных и страховых запасов на каждой операции технологического процесса.

Из практики известно, что для производств с быстро меняющимся ассортиментом продукции, выпуском продукции небольшими сериями актуальными являются следующие задачи: рациональное использование основного технологического оборудования, рациональное использование фонда рабочего времени, повышение коэффициента загрузки оборудования; уменьшение времени простоев, в том числе вследствие несогласованности производительности смежных единиц оборудования, оптимальная величина заделов, вместимость складских помещений.

Кроме того, немаловажное значение при построении технологических схем имеют формы организации производственного процесса, временные оценки полного производственного цикла [7, 8].

Таким образом, можно отметить, что по своей сути производственные процессы изготовления металлоемких изделий в авиастроении являются сложными с точки зрения их организации. И именно имитационное моделирование позволяет максимально полно воспроизвести сложные производственные ситуации для всестороннего исследования процессов и оптимизации их организации.

### **История развития систем имитационного моделирования**

Программы имитационного моделирования появились и развиваются исходя из того, что применение данных систем позволяет отказаться от моделирования процессов, объ-

ектов и явлений через описание основных характерных признаков последних и их поведения посредством программирования на языках высокого уровня. Они не только обеспечивают снижение трудоемкости по построению моделей, проведению имитационного моделирования, но и обеспечивают возможность применения этих систем специалистами, далекими от программирования (например, технологами или специалистами по автоматизации технологических процессов и производств).

С этой точки зрения можно отметить, что история развития имитационных сред может быть представлена в виде последовательной смены шести поколений [9].

1. Первое поколение (примерно 1950-е гг.) характеризуется построением имитационных моделей посредством программирования на языках высокого уровня. При этом имитационная модель строится для каждого конкретного процесса, явления или объекта без какой-либо специальной поддержки.

2. Второе поколение (примерно 1960-е гг.) характеризуется специальной поддержкой моделирования в виде соответствующих библиотек подпрограмм, специальных выражений языков программирования, генераторов случайных чисел, средств представления результатов. Уже в период 1960–1965 гг. появляются первые языки моделирования: CSL (язык работ), Simula (язык процессов), Simgcript (язык событий), GPSS (язык транзактов).

3. Третье поколение (1970-е гг.) характеризуется интенсивным развитием уже разработанных средств моделирования, ориентированных на повышение эффективности процессов моделирования и превращения имитационного моделирования в более простой и быстрый метод исследования сложных систем. Системы моделирования, разработанные в 1960–1970-е гг., были еще слишком сложны для широкого пользователя, прежде всего из-за сложности текстовой формы описания модели [9, 10].

4. Четвертое поколение (1980-е гг.) характеризуется ориентацией прикладных программ имитационного моделирования на конкретные области применения, на конкретные производственные системы. В это же время начинает активно развиваться анимация в данных системах. Делается ставка на визуализацию процесса создания моделей. Появляются и развиваются такие продукты, как GPSS PC, PC Model simfactory.

5. Пятое поколение (1990-е гг.). В данный период создаются программы, имеющие ярко выраженный графический интерфейс.

6. Шестое поколение (конец 1990-х гг.—наше время). Создаются мощные программные комплексы имитационного моделирования (Arena, Anylogic, ProModel Solutions, Enterprise Dynamics и др.), в которых развиваются важнейшие особенности программных сред пятого поколения [11, 12].

### **Анализ программ имитационного моделирования для исследования производственных процессов**

В настоящее время компьютерное имитационное моделирование широко используется при анализе производственных процессов, анализе транспортных перевозок, в моделировании процессов складирования, при анализе работы различных технических систем, при моделировании характера течения металла и т.д. [13, 14]. В рассматриваемом анализе будут исследоваться только те системы, которые направлены на исследование производственных процессов и систем.

В выборе имитационной среды необходимо помнить, что исследование динамики функционирования производственного процесса какого-либо предприятия при помощи имитационного моделирования систем позволяет не только найти оптимальный способ организации производства, но и усовершенствовать уже функционирующие процессы, что позволяет без кардинальной перестройки многократно увеличить их эффективность [15, 16].

При выборе программ для проведения имитационного моделирования крайне важно учитывать тот факт, что целесообразным является не создание моделей программированием на языках высокого уровня, а именно технология построения компьютерных моделей и проведения имитационных экспериментов при помощи уже готовых специализированных компьютерных сред (например, Deneb/Quest, Arena, AnyLogic др.). Имитационные среды не требуют программирования в виде определенной последовательности команд. Вместо написания программы пользователи составляют модель из встроенных графических модулей, заполняют специальные формы, описывающие производственную среду, заполняют информационные таблицы [17, 18].

В практике имитационного моделирования существует три основных подхода, используемых для создания динамических моделей производственных сред и процессов: системная динамика, дискретно-событийное моделирование и агентное моделирование. Системная динамика предполагает высокий уровень абстракции и в основном используется для задач стратегического уровня: например, чтобы спрогнозировать темп восприятия нового товара на рынке. Дискретно-событийный (процессно-ориентированный) подход используется в основном на операционном и тактическом уровнях, например, при моделировании производственных процессов или при оценке инвестиций в оборудование. Агентные модели применяются в задачах разных уровней абстракции; агент может представлять собой любой объект в действии. Именно последние два подхода наиболее приемлемы для имитации производственных сред.

В ряде исследований также отмечается, что особое внимание следует уделять программам, которые работают по принципам дискретно-событийного моделирования или многоподходного имитационного моделирования, как наиболее перспективным и дающим наилучшие результаты имитационных экспериментов. Отмечается, что идея многоподходного имитационного моделирования довольно проста: она дает возможность органично совмещать и комбинировать методы моделирования так, чтобы достоинства одних подходов компенсировали недостатки других [19].

Другим важным моментом является возможность визуализации и доступные механизмы анализа работы имитационной модели. С точки зрения визуализации для каждой прикладной системы моделирования положительным моментом является:

- возможность анимации модели и визуализация данных;
- возможность 3D анимации;
- возможность просмотра работы модели в режиме реального и ускоренного времени.

Для сравнительной оценки также важно исследовать доступные механизмы анализа имитационной среды. Программный продукт является конкурентоспособным, если он обеспечивает:

- возможность проведения анализа чувствительности;
- возможность проведения оптимизации производственной среды;
- применение метода Монте-Карло;
- возможность осуществления сценарного анализа [20, 21].

На основе вышеперечисленных критериев отбора имитационных сред были определены наиболее перспективные программные продукты для проведения моделирования производственных процессов, представленные на отечественном рынке и успешно применяемые для имитационного моделирования производственных процессов металлоемких производств на предприятиях машиностроения.

В таблице представлены сведения по наиболее перспективным программным продуктам отечественного рынка программ имитационного моделирования.

*Прикладные программы для имитационного моделирования производственных процессов металлоемких производств*

№	Наименование программы имитационного моделирования	Область применения прикладной программы имитационного моделирования	Разработчик	Сайт программного продукта, разработчика или дистрибьютора в Российской Федерации
1	Arena	У данной программной среды много различных областей применения, в частности решение транспортных задач, оптимизации клиентского и банковского обслуживания, но наиболее перспективное направление – это имитационное моделирование технологических процессов.	Rockwell Automation Inc., Wexford, PA, США	<a href="http://www.arenasimulation.com">http://www.arenasimulation.com</a>

		В нашей стране и за рубежом программа используется в основном для моделирования процессов металлургии, машиностроения, пищевого производства и текстильной промышленности. Программа достаточно широко распространена и показала высокую адекватность результатам имитационного моделирования реальным производственным процессам		
2	AutoMod	Наиболее широкое применение данной программной среды: автомобильная, аэрокосмическая отрасли, моделирование аэропортов, производство, складирование и сбыт. В принципе изначально система система AutoMod была предназначена для моделирования систем логистики и производства. Поэтому основная часть данного программного обеспечения разработана для детального анализа проводимых технологических операций и материальных потоков на производстве	Brooks Automation, США	<a href="http://www.automod.se/eng/home.html">http://www.automod.se/eng/home.html</a>
3	AnyLogic	В отличие от других систем имитационного моделирования Arena, AutoMod программа AniLogic является не только программой дискретного моделирования, но и программой агентного моделирования. Агентное моделирование сосредоточено на индивидуальных участниках системы. В этом заключается его отличие от более абстрактного метода системной динамики и дискретно-событийного метода, ориентированного на процессы. В агентном моделировании сначала устанавливаются параметры активных объектов – агентов, и определяется их поведение. В виде агентов может быть представлено что угодно, что имеет значение для исследуемой системы: рабочие, транспорт, оборудование, даже продукты и компании. Затем устанавливаются связи между агентами, задается окружающая среда и запускается моделирование. Индивидуальные действия каждого из агентов образуют глобальное поведение моделируемой системы	ООО "Экс Джей Текнолоджис" ("XJ Technologies"), Российская Федерация	<a href="http://www.anylogic.ru">http://www.anylogic.ru</a>
4	AweSim	AweSim – это универсальная система имитационного моделирования. Возможные области применения: бизнес, промышленность, военное дело. По сути, эта программа – аналог программ Arena, AutoMod	Symix Systems Inc., США	---
5	Deneb/Quest	Это программа для имитации и анализа поточных производственных процессов. Производственники, технологи и менеджеры могут разработать и проверить варианты потоков на имитационных моделях, сформированных в данной системе. В модели вводятся перечень и план размещения технологического оборудования, размещения материальных ресурсов, рабочих и рабочих бригад. По своей сути эта программа – гибкая, объектно-ориентированная среда имитации дискретных процессов, соединенная с визуализацией и системой импорта/экспорта построенных моделей	BNP Deneb Pty Ltd., Австралия.	<a href="http://deneb.com.au">http://deneb.com.au</a>
6	Enterprise Dynamics	Это ведущая программная платформа для бизнес-моделирования. Каждая отрасль или индустрия имеют дело с уникальными материалами, оборудованием и другими ресурсами. Созданы следующие вариации программы: ED Logistics (Логистика), ED Plato, ED Airport (Аэропорт), ED Transport (Транспорт), ED Warehouse (Склад), ED Educational	Incontrol Simulation Solutions, Нидерланды	<a href="http://www.incontrolsim.com">http://www.incontrolsim.com</a>

7	Tecnomatix Plant Simulation	Программный комплекс Tecnomatix Plant Simulation представляет собой инструмент дискретного имитационного моделирования, который позволяет создавать цифровые модели логических систем (например, производства) для определения характеристик системы и оптимизации ее производительности. Созданные цифровые модели позволяют проводить эксперименты и прорабатывать сценарии "что, если" без вмешательства в работу существующих производственных систем или (при использовании в процессе планирования) задолго до внедрения реальных систем. Обширный набор аналитических инструментов (анализ узких мест, статистические данные и графики) помогает оценить различные сценарии производства. Полученная в результате этого информация необходима для быстрого принятия верных решений на ранних стадиях планирования производства. Plant Simulation позволяет моделировать и воспроизводить производственные системы и их технологические процессы. Кроме того, обеспечивается возможность оптимизации материалопотоков, использования ресурсов и логистики на всех уровнях планирования производства, от глобальных производственных объектов до региональных заводов и отдельных производственных линий [22]	Siemens Industry Software, Германия	---
8	ProModel Solutions	Данная прикладная программа имитационного моделирования представляет собой инструмент дискретно-событийного моделирования, также позволяет моделировать прерывные и непрерывные процессы. ProModel Solutions используется для оценки, планирования и проектирования производств, складирования, логистики	ProModel Corporation, США	<a href="http://www.promodel.com/">http://www.promodel.com/</a>
9	Simplex3	Simplex3 отличается от других инструментов моделирования в его универсальной применимости, особенно для областей дискретных моделей. При дискретно-событийном моделировании движение производственного объекта (например, сырья, полуфабрикатов, материалов) от одного оборудования к другому представляется как два события: отправление и поступления. При производстве также отмечается время поступления материала на операцию и время ее окончания. Технологический процесс – это лишь временная задержка между событиями. Из-за его универсальности эта программная среда идеально соответствует потребностям обучения и исследования в университетах. В промышленности это особенно интересно в областях, где ощущается нехватка подготовленных специалистов по моделированию	---	<a href="http://www.simplex3.net">http://www.simplex3.net</a>
10	Simul8	Пакет Simul8 в основном предназначен для анализа производственных процессов. Стандартная программа имитационного моделирования	Corporate Headquarters, Бостон, США.	<a href="http://www.simul8.com/">http://www.simul8.com/</a>
11	Witness	Прикладная программа отличается тем, что представляет собой блочное графическое моделирование. Включает примерно пятьдесят стандартных блоков. Основные блоки программы для имитационного моделирования можно скооперировать в следующие группы: детали, станки, запасы, буфера, работы	The Lanner Group Ltd, США	<a href="http://www.witness-for-simulation.com/">http://www.witness-for-simulation.com/</a>

		Программный комплекс применяется для моделирования производственных процессов, оптимизации, планирования, календарного планирования, моделирования бизнес-процессов		
--	--	---	--	--

Все вышеперечисленные прикладные программы могут использоваться для моделирования производственного процесса изготовления материалоемких деталей. Данные прикладные программы обеспечивают:

- планирование производства;
- проектирование производственных помещений и планирование производительности;
- совершенствование процессов, анализ слабых мест;
- оптимизацию производственного цикла;
- оптимизацию ресурсов: персонала и оборудования;
- планирование запасов (в частности, сырья и незавершенного производства).

При выборе имитационной среды необходимо учитывать тот факт, что исследование динамики функционирования производственного процесса предприятия при помощи имитационного моделирования систем позволяет не только найти оптимальный способ организации производства, но и усовершенствовать уже функционирующие процессы, что позволяет без кардинальной перестройки многократно увеличить их эффективность [23].

Безусловно, выбор той или той имитационной среды лежит исключительно на конкретном потребителе. Немаловажным фактором является и стоимость программного продукта. Она варьируется в пределах порядка от 360 000 руб. за программу имитационного моделирования AnyLogic 6.3.1 (разработчик: ООО "Экс Джей Текнолоджис" ("XJ Technologies"), РФ) до примерно 760 000 руб. за программный продукт Arena 12.0 (разработчик Rockwell Automation Inc. (Systems Modeling), США) [9].

### Выводы

Таким образом, на основе проведенных исследований обоснована целесообразность использования имитационного моделирования в специальных прикладных средах при проектировании и оптимизации производственных систем по изготовлению металлоемких деталей предприятиями отечественного машиностроения. Очевидно, что другие мето-

ды моделирования (математические, натурные, физические и др.) мало применимы для моделирования сложных систем, к которым можно отнести производственные среды. Это обусловлено сложностью реализации данных методов моделирования (например, физического или натурального метода моделирования) и дороговизной реализации методов.

Сформулированы основные требования к имитационным программам и критерии их отбора для проведения имитационного моделирования. Исследованы возможности программных сред имитационного моделирования как отечественных, так и зарубежных разработчиков, представленных на современном российском рынке информационных технологий.

Выбор предприятием той или иной программы имитационного моделирования должен вестись не только на основе выявленных возможностей программных сред, но и также зависит от ряда дополнительных факторов:

- от наличия опыта специалистов конкретного предприятия в области работы с той или иной программой имитационного моделирования, от возможности организации обучающих курсов и тренингов на сайте разработчика;
- от возможности бесплатного дистанционного обучения работе с программой;
- от стоимости программной среды;
- от возможности организации оперативного консультирования разработчиком программного продукта или специалистами его дилерского центра, от возможности организации оперативной технической поддержки.

### Список литературы

1. Ревина И.В., Бояркин Г.Н. Имитационное моделирование производственного процесса изготовления деталей // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 230–234. doi: 10.25206/1813-8225-2018-162-230-234.
2. Белоусов В.Е., Крахт Л.Н., Поцбнева И.В. Модель построения оптимальной структуры бизнес-процессов в системе организационного управления // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7, № 1. С. 195–197.

3. *Имитационное моделирование производственных систем* / под общ. ред. А.А. Вавилова. М.: Машиностроение, 1983. 416 с.
4. *Строгалев В.П., Толкачева И.О.* Имитационное моделирование. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. С. 737.
5. *Shannon R.E.* Introduction to the art and science of simulation / Ed.: Medeiros D. J., Watson E. F., Carson J. S. [et al.] // Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference. 1998. P. 7–14.
6. *Свирищев В. И.* Оптимизация технологических процессов механической обработки: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Пермского государственного технологического университета, 2006. 116 с.
7. *Машиностроение.* Энциклопедия / ред. совет: К.В. Фролов и др. М.: Машиностроение. Т. III-2. Технологии заготовительных производств. / И.Л. Акаро, Р.А. Андриевский, А.Ф. Аржанов и др.; под общ. ред. В.Ф. Мануйлова. 1996. 736 с.
8. *Братухин А.Г., Иванов Ю.Л., Марьин Б.Н. и др.* Современные технологии авиастроения / под ред. А.Г. Братухина, Ю.Л. Иванова. М.: Машиностроение, 1999. 832 с.
9. *Михеева Т.В.* Обзор существующих программных средств имитационного моделирования при исследовании механизмов функционирования и управления производственными системами // Журнал теоретических и прикладных исследований "Известия Алтайского государственного университета". Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. № 1(61), 2009. С. 87–90.
10. *Yan-mei Y., Xin-jun L.* Optimization of Ex-warehouse and Warehousing for Logistics Park Based on Computer Simulation // Proceedings of the 2016 3rd International Conference on Materials Engineering, Manufacturing Technology and Control (ICMEMTC 2016). 2016. P. 1331–1337. doi: 10.2991/icmemtc-16.2016.261.
11. *Kelton W.D., Sadowsky R.P., Sturrock D.T.* Simulation with Arena. 3rd ed., N.Y.: The McGraw-Hill Companies, 2010. 658 p.
12. *Oprea C., Rosca E., Popa A. [et al.].* The quality of service in passenger transport terminals // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 161. P. 1–9.
13. *Кокарева В.В., Смелов В.Г., Шитарев И.Л.* Имитационное моделирование производственных процессов в рамках концепции "бережливое производство" // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. № 3(34). С. 131–134.
14. *Карпов Ю.Г.* Имитационное моделирование систем. СПб.: Наука, 2006. 723с.
15. *Nyemba W.R.* Modeling, simulation and optimization of the materials flow of a multi-product assembling plan // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 8. P. 59–66.
16. *Поцбенева И.В., Иванова А.В., Иварлак К.Д., Ермакова О.В.* Анализ программ имитационного моделирования для совершенствования процессов и конструкций // 8-й ВНТК "Современные инновации в науке и технике". Воронеж: 19–20 апреля 2018 г. С. 162–166.
17. *Васимова И.Н., Садковская Н.Е., Садковский Б.П., Жаров М.В.* Оптимизация производственных процессов с помощью моделирования в программной среде AnyLogic на предприятиях авиационной и ракетно-космической отрасли // Научно-технический журнал "Наукоемкие технологии". М.: Изд-во "Радиотехника". 2018. №6. С. 18–24.
18. *Жаров М.В.* Имитационное моделирование производственной среды цехов механической обработки // Автоматизация в промышленности. 2020. № 5. С. 34–37.
19. *Кудряшова Э.Е.* Визуальное моделирование при разработке бизнес-плана // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2008. № 8 (46). С. 104–108.
20. *Кабанов А. А.* Имитационное моделирование в производстве авиационных и ракетно-космических систем. Что предшествует эксперименту? // Труды МАИ. Вып. № 65. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/> (дата обращения: 12.06.2021).
21. *Алешина Е.Е., Саломатина А.А., Яблочников Е.И.* Создание имитационной модели сборочной линии с использованием системы DELMIA // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 1 (71). С. 50–53.
22. *Абрамова И.Г., Проничев Н.Д., Абрамов Д.А., Коротенкова Т.Н.* Имитационное моделирование организации производственных процессов машиностроительных предприятий в инструментальной среде Tecnomatix Plant Simulation: лабораторный

практикум. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2014. 80 с.  
23. Рванцов Ю.А. Сравнительный анализ систем имитационного моделирования деловых

процессов по критерию функциональной полноты // Вестник ДГТУ. 2011. Т. 11, № 1(52) С. 69–72.

## **Research of prospects of application of software environments of simulation modeling in the development and optimization of mechanical engineering production**

**M. V. Zharov**

Federal state budgetary educational institution of higher education "Moscow Aviation Institute" (National Research University); 4, Volokolamskaya st., Moscow, 125993, Russia  
MaximZharov@mail.ru

The article presents the results of the market research of applied simulation programs from the point of view of the possibility and expediency of using the latter in the development or optimization of technological processes at domestic machine-building enterprises. The features of technological processes of mechanical engineering and aircraft construction at domestic enterprises are analyzed. The features of the production of metal-intensive products and semi-finished products are studied from the point of view of the feasibility of simulation modeling of these processes. The expediency of conducting simulation modeling of machine-building industries is determined, which provides adequate analysis results at minimal cost compared to other modeling methods. The main criteria for selecting a specific simulation software are defined.

**Keywords:** *technological processes; mechanical engineering technologies; metal-intensive production; aircraft construction; deformation processing of metals and alloys; foundry production; equipment performance; optimal stocks of semi-finished products; insurance stocks; simulation modeling; visualization; discrete-event approaches in modeling; criteria for choosing simulation environments.*