

Научная статья

УДК 378.147.88:004.94

DOI: 10.17853/2587-6910-2024-13-29-39

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СЛОЖНОСТИ СИСТЕМ В ПРОЕКТНОЙ МЕТОДИКЕ ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ В ВУЗЕ

Андрей Витальевич Горохов

доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор,
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»
(ФГБОУ ВО «ПГТУ»), <https://orcid.org/0000-0001-7276-8818>, Йошкар-Ола, Россия,
GorokhovAV@volgatech.net

Наталья Александровна Власова

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, ФГБОУ ВО «Поволжский
государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «ПГТУ»),
<https://orcid.org/0000-0003-2844-7464>, Йошкар-Ола, Россия,
VlasovaNA@volgatech.net

***Аннотация.** В статье предлагается проектная методика проведения лабораторных занятий по дисциплине «Системный анализ» и другим дисциплинам, включающим в себя развитие системного подхода. В основе методики лежит имитационное моделирование, которое наиболее ярко иллюстрирует применение системного подхода к решению сложных задач. Применение данной методики способствует развитию у обучаемых более глубокого понимания сложных процессов, происходящих в системах различной природы.*

***Ключевые слова:** системный подход, сложная система, имитационное моделирование, проектная методика, лабораторные занятия*

***Для цитирования:** Горохов А. В., Власова Н. А. Имитационное моделирование как инструмент исследования динамической сложности систем в проектной методике проведения лабораторных занятий в вузе // Новые информационные технологии в образовании и науке. 2024. № 13 С. 29–39 <https://doi.org/10.17853/2587-6910-2024-13-29-39>*

SIMULATION MODELLING AS AN INSTRUMENT OF INVESTIGATION OF DYNAMIC COMPLEXITY OF SYSTEMS IN THE FRAME OF PROJECT TEACHING METHODS IN LABORATORY PRACTICALS AT INSTITUTION OF TERTIARY EDUCATION

Andrey Vitalievich Gorokhov

DSc, Senior research officer, Professor,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volga State University of Technology», <https://orcid.org/0000-0001-7276-8818>, Yoshkar-Ola, Russia

Natalia Aleksandrovna Vlasova

Ph.D, Associate professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volga State University of Technology»,
<https://orcid.org/0000-0003-2844-7464>, Yoshkar-Ola, Russia,

Abstract. *The article deals with project teaching methods in laboratory practicals of “System analysis” and other courses, which include development of a system approach. On the base of the teaching methods is a simulation modelling, as a bright example of system approach using for solving complex problems. Using of that method is a good way for trainees to develop deep understanding of complex processes, which exist in systems of different genesis.*

Keywords: *system approach, complex system, simulation modelling, project teaching methods, laboratory practicals*

For citation: Gorokhov A. V., Vlasova N. A. Simulation modelling as an instrument of investigation of dynamic complexity of systems in the frame of project teaching methods in laboratory practicals at institution of tertiary education // *New information technologies in education and science*. 2024; 13:29-39. <https://doi.org/10.17853/2587-6910-2024-13-29-39>

简评：文章探讨了一种设计大纲，用于在系统分析学科和其他包括系统方法开发的学科中开展实验室上课方法。该方法基于模拟建模，可以清楚地说明如何使用系统方法来解决复杂问题。使用这种方法可以让学生对各种性质的系统中发生的复杂过程有更深入的了解。

主题词：系统方法；复杂系统；模拟建模；设计大纲；实验课。

Введение

Наблюдаемое в последние 15–20 лет множество образовательных стандартов в системе высшего образования свидетельствует о наличии проблем, связанных с целеполаганием в данной области. Чтобы ответить на вопросы: чему учить и как

учить? нужно ответить на вопросы: для чего учить, и что мы хотим получить в результате обучения. До принятия Россией Болонской системы на выходе мы получали человека-творца, всесторонне развитую личность. Потом его заменил человек-потребитель. События последних лет показали, что если мы хотим сохранить суверенитет, не превратиться в страну-бензоколонку под внешним управлением во всех сферах нашей жизни, то нам необходимо развивать свою промышленность, науку, оборону, сельское хозяйство... Для решения таких задач компетенций человека-потребителя может оказаться недостаточно.

Обзор литературы

Одно из принципиальных отличий человека-творца от человека-потребителя — это развитие критического мышления. В основе критического мышления лежит — системный, то есть видение объекта как систему, которая не только состоит из взаимодействующих частей, но и сама является частью некой надсистемы [1]. Такой подход позволяет понимать истинные, часто неочевидные причины событий, процессов в окружающем нас мире. Ограничением здесь является возможность человеческой системы переработки информации. Когнитивистика утверждает, нам что объем кратковременной памяти человека, которую он использует для отражения (моделирования) информации, поступающей из окружающего мира через сенсорные регистры, всего 7 чанков — число Миллера [2]. Поэтому, для понимания объектов окружающего мира человеку более свойственны древовидные структуры (модели), которые позволяют оперировать небольшим количеством объектов (понятий), меняя степень их агрегирования в зависимости от уровня иерархии модели. Такой подход позволяет преодолевать комбинаторную сложность объектов окружающего мира. Из теории сложности известно, что все сложные системы обладают, как правило, комбинаторной и динамической сложностью [3]. Динамическая сложность, возникающая из-за взаимодействия в системе петель обратной связи, приводит к изменению привычного человеку вида причинно-следственных связей. Они становятся нелинейными (следствие непропорционально причине) и «длинными» (причина и следствие отдаляются друг от друга во времени и пространстве). Для преодоления динамической сложности человек использует различные приемы и инструменты. Одним из наиболее мощных инструментов исследования сложных динамических систем с целью выявления причинно-следственных связей является имитационное моделирование. В книге Джона Стермана *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World* [4] приводятся результаты обследования 1000 крупнейших предприятий США, свидетельствующие о популярности имитационного моделирования при решении задач внутрифирменного планирования крупными компаниями. В образовательном процессе ведущих российских вузов применение имитационного моделирования не так популярно [5–7] в отличие от зарубежных [8–15]. Вероятно, это объясняется отсутствием теоретического обоснования получаемых результатов моделирования и различием российского и западного подходов к имитационной науке.

Методология, материалы и методы

Имитационное моделирование является разделом прикладной математики и в современном «техническом» понимании подразумевает вычисление значений некоторых характеристик развивающегося во времени процесса путем воспроизведения течения этого процесса на компьютере с помощью его математической модели [16]. В большинстве случаев оно применяется тогда, когда получить требуемые результаты другими способами невозможно или крайне затруднительно. Основная задача имитационного моделирования заключается в создании в лабораторных условиях наглядной картины функционирования объекта исследования в различных аспектах [17]. Для сложного объекта исследования достигнуть этого, как правило, очень трудно из-за отсутствия «наглядности» протекающих в нем процессов, которые нужно визуализировать и представить в компактном виде. Такой инструмент, как имитационное моделирование, обеспечивает исследователю возможность экспериментирования на модели объекта исследования с целью выявления причинно-следственных связей. Разработка имитационной модели является сложным итерационным процессом, в результате которого развивается как модель, так и соответствующие когнитивные структуры разработчика модели. Следовательно, имитационное моделирование является наиболее яркой иллюстрацией применения системного подхода к решению сложных задач. Практически все разработчики систем имитационного моделирования указывают на необходимость системного подхода к построению и реализации имитационных моделей и рассмотрению объекта моделирования как системы.

Поэтому, по мнению авторов, целесообразно в рамках проведения лабораторных занятий по таким дисциплинам, как системный анализ, общая теория систем, теория моделей и тому подобным, развивающим критическое мышление, использовать имитационное моделирование. Здесь существенный интерес для развития системного (критического) мышления представляет как процесс исследования сложных систем с целью выявления причинно-следственных связей, так и итерационный процесс создания имитационной модели объекта, обладающего динамической сложностью. В первом случае инструмент (имитационное моделирование) помогает выявлять неочевидные причинно-следственные связи, оказывающие существенное влияние на поведение исследуемого объекта. Во втором случае — развитие когнитивных структур, позволяющих «понимать» причины того или иного поведения системы как результат воздействия и взаимодействия в системе петель обратной связи.

Результаты исследования

Проектная методика включает в себя все этапы жизненного цикла имитационной модели. Особое внимание уделено ранним этапам моделирования, таким как системное рассмотрение проблемной ситуации, определение моделируемого объекта и цели моделирования, которые являются наиболее важными с точки зрения системного подхода. Недостаточная проработка данных этапов может привести к серьезным затруднениям на последующих этапах моделирования. Поэтому, после ознакомления с инструментальными системами имитационного моделирования

студент самостоятельно изучает проблемную ситуацию в области его будущей профессиональной деятельности и определяет объект моделирования. Объект моделирования согласовывается с преподавателем. На этапе согласования объекта моделирования формулируется цель моделирования и соответствующие ей процессы, которые в дальнейшем будут имитироваться на модели. Далее определяется размерность модели, то есть количество и соответствующий набор факторов, которые будут оказывать влияние на моделируемые процессы. От мощности данного множества и его содержания существенно зависит сложность реализации будущей модели. Данный этап выполняется преподавателем на основе личного опыта моделирования. Следующий этап — определение входных и выходных параметров модели. Входные и выходные параметры модели определяются студентом на основе принципа целеполагания и согласовываются с преподавателем.

Для формализации данных этапов моделирования используется разработка концептуальной модели. Концептуальная модель представляет собой набор причинно-следственных связей между объектами, получаемых в результате декомпозиции объекта моделирования и соответствующих процессов. Например: на рисунке 1 представлена концептуальная модель процесса производства и реализации некой продукции [18]. Специфика причинно-следственных связей, составляющих модель, заключается в их формализации в следующем виде: Параметры n и k могут быть связаны отношением R (увеличение n приводит к увеличению k) или отношением B (увеличение n приводит к уменьшению k). $R1$ — увеличение производства продукции приводит к увеличению ее реализации; $R2$ — увеличение реализации продукции ведет к увеличению получаемых в процессе реализации денег; $R3$ — увеличение количества денег ведет к увеличению производства продукции; $R4$ — повышение цены на продукцию приводит к увеличению получаемых в процессе реализации продукции денег; $R5$ — увеличение спроса на продукцию ведет к увеличению ее реализации.

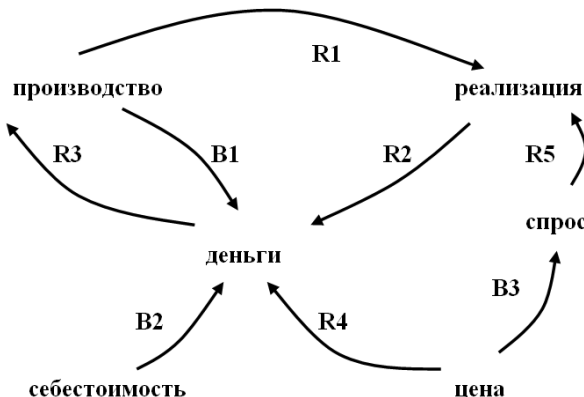


Рис. 1. Концептуальная модель «Производство – реализация»

$B1$ — увеличение производства продукции ведет к уменьшению количества денег, ввиду затрат на производство; $B2$ — увеличение себестоимости продукции ведет также к уменьшению количества денег; $B3$ — повышение цены на продукцию уменьшает спрос на нее.

Формализации объекта моделирования в виде данной концептуальной модели удобна для студента, поскольку ее структура соответствует естественному процессу наращивания системных знаний человеком. Данной концептуальной модели однозначно соответствует следующая структура имитационной модели [18], реализованная на языке системных (поточковых) диаграмм (рис. 2). В модели реализованы два материальных потока — это поток продукции «produce и sale» и поток денег «credit и debet». Для аккумуляции первого потока использованы уровни «storage и All», второго — «account». Поток производства продукции «produce» зависит от инвестиций в этот процесс «debet» и себестоимости производства единицы продукции «prime_cost». Поток реализации продукции «sale» зависит от спроса «demand» и наличия продукции «storage», спрос «demand» зависит от цены реализации продукции «price». Доход зависит от объема реализации продукции «sale» и цены реализации «price». Расход «debet» — от наличия оборотных средств «account».

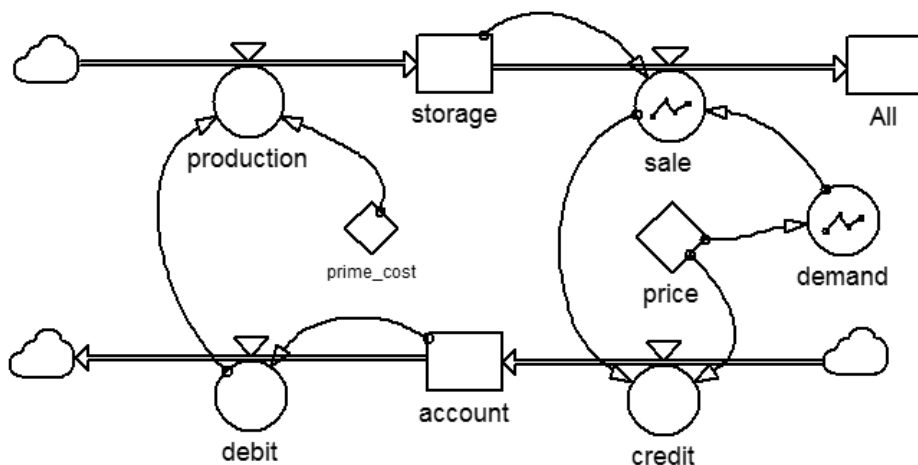


Рис. 2. Системно-динамическая модель «Производство – реализация»

Далее, исходя из набора выходных параметров, сущности моделируемых процессов и цели моделирования, определяется шаг интегрирования модели. В некоторых случаях выбирается наиболее эффективный метод интегрирования. Данный этап выполняется студентом при непосредственной поддержке преподавателем. После этого преподавателем на основе личного опыта разработки имитационных моделей выбирается наиболее подходящий тип будущей модели: системно-динамическая или мультиагентная модель. Для реализации системно-динамических моделей используются системы имитационного моделирования Powersim [19] и AnyLogic [20], для реализации мультиагентных моделей используется система имитационного моделирования AnyLogic.

Затем следует самый трудоемкий, самый длительный и самый интересный этап — развитие модели. Он представляет собой итерационный процесс верифика-

ции модели, корректировки значений параметров и корректировки структуры модели. Выполняется данный этап студентом самостоятельно под контролем преподавателя. В результате развивается не только модель, но и, что особенно важно и является главной целью предлагаемой проектной методики, соответствующие когнитивные структуры студента. Результатом данного этапа проектной методики и всего проекта является имитационная модель, реализованная средствами выбранной системы имитационного моделирования и результаты исследования модели в виде нескольких, актуальных для исследуемой предметной области, сценариев. Главным критерием оценки работы (проекта) является адекватность полученных на модели сценариев реальным процессам исследуемой предметной области. Кроме того, учитывается корректность интерпретации результатов моделирования для различных сценариев, чувствительность модели относительно входных параметров, устойчивость динамической системы (модели) на всем диапазоне допустимых значений входных параметров, степень формализации моделируемых процессов, размер модели (количество переменных).

Обсуждение

В работе сделан акцент на ранние, менее изученные с точки зрения формализации и алгоритмизации, этапы имитационного моделирования. Системное рассмотрение проблемной ситуации, результатом которого является определение моделируемого объекта и соответствующих цели моделирования и процессов, опирается на системный подход — рассмотрение вмещающей системы, что характерно для российской — советской школы имитационного моделирования. Теоретические основы такого подхода заложены еще в 40–50 годы [21, 22], когда при пятилетнем планировании развития народного хозяйства СССР экономика страны рассматривалась как единое целое. Исходя из этого, определялись цели отраслей экономики и далее до отдельных предприятий. Западный — американский подход — в то время во главу угла ставил цели развития отдельных (частных) предприятий, функционирующих в недетерминированной (рыночной) внешней среде [23], что привело к значительному развитию систем (пакетов) имитационного моделирования и, с другой стороны, упрощению законов функционирования моделируемых объектов. К сожалению, эти недостатки западного подхода появились в современной трактовке и российских идей имитационного моделирования. Возможно, это объясняется тем, что российские молодые ученые в 90–00-х годах не имели возможность изучать опыт советских ученых, так как не издавались и не переиздавались соответствующие книги, и включились в гонку: создания своих систем имитационного моделирования по образцу западных». В результате имитационное направление в современной науке почти утратило важный элемент — системный подход к объектам моделирования.

Заключение

Применение имитационного моделирования в качестве инструмента исследования динамической сложности систем при проведении лабораторных занятий в вузе позволяет повысить эффективность освоения студентами таких дисциплин

Имитационное моделирование как инструмент исследования динамической сложности систем в проектной методике проведения лабораторных занятий в вузе как системный анализ, общая теория систем, теория моделей и тому подобных, развивающих критическое мышление. Имитационное моделирование обеспечивает создание в лабораторных условиях наглядной картины функционирования объекта исследования в различных аспектах и дает возможность экспериментирования на модели данного объекта.

Список литературы

1. Перегудов Ф. И., Тарасенко Ф. П. Введение в системный анализ. Москва: Высшая школа, 1989. 367 с.
2. Солсо Р. Когнитивная психология. Санкт-Петербург: Питер, 2006. 589 с.
3. Солодовников В. В., Тумаркин В. И. Теория сложности и проектирование систем управления. Москва: Наука, 1990. 168 с.
4. Sterman J. D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Boston: Irwin/McGraw-Hill, 2000. XXVI, 982 p.
5. Константинов Е. В., Тимченко В. С. Применение имитационного моделирования в учебном процессе транспортного ВУЗа // Мир науки. Педагогика и психология. 2015. № 3. URL: <https://mir-nauki.com/PDF/42PDMN315.pdf> (дата обращения: 09.08.2024).
6. Гордиенко Т. П., Марченко С. Г. Имитационное моделирование как перспективный метод повышения качества образования // Современное педагогическое образование. 2023. № 4. С. 24–28. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-kak-perspektivnyy-metod-povysheniya-kachestva-obrazovaniya> (дата обращения: 09.08.2024).
7. Власов Д. А., Синчуков А. В. Имитационное исследование теоретико-игровых моделей на основе wolfram-технологий // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2020. № 1. <https://doi.org/10.25559/SITITO.16.202001.235-245>.
8. Simulation-Based Learning in Higher Education: A Meta-Analysis / O. Chernikova, N. Heitzmann, M. Stadler, D. Holzberger, T. Seidel, F. Fischer // Review of Educational Research. 2020. Vol. 90, iss. 4. P. 499–541. <https://doi.org/10.3102/0034654320933544>.
9. Simulation-Based Education in US Undergraduate Medical Education: A Descriptive Study / K. K. Campbell, K. E. Wong, A. M. Kerchberger, J. Lysikowski, D. J. Scott, M. S. Sulistio // Simulation in Healthcare. The Journal of the Society for Simulation in Healthcare. 2023. Vol. 18, iss. 6. P. 359–366. <https://doi.org/10.1097/SIH.0000000000000705>.
10. Lehtinen E. Can simulations help higher education in training professional skills? // Learning and Instruction. 2023. Vol. 86. P. 101772. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2023.101772>
11. Practical exercises of computer-aided process synthesis for chemical engineering undergraduates / J. S. Krunal, A. Mehta, S. R. Panda, H. Panchal, R. Sinha // Education for Chemical Engineers. 2024. Vol. 48. P. 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2024.04.002>.

12. Introducing process simulation as an alternative to laboratory session in undergraduate chemical engineering thermodynamics course: A case study from Sunway University Malaysia / Z. Y. Kong, Abdul Aziz Omar, Sian Lun Lau, J. Sunarso // Digital Chemical Engineering. 2024. Vol. 12. P. 100167. <https://doi.org/10.1016/j.dche.2024.100167>.

13. Simulation-based education involving online and on-campus models in different European universities / N. Campos, M. Nogal, C. Cali et al. // International Journal of Educational Technology in Higher Education. 2020. Vol. 17. Art. 8. <https://doi.org/10.1186/s41239-020-0181-y>

14. Hubalovsky S. System Approach, Modeling, Simulation as Educational Technologies in Algorithm Development and Programming // Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2015. Vol. 191. P. 2226–2230. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.04.267>.

15. Control-oriented Aircraft Modelling and Analysis Framework for Educational Purposes / R. D. Mocsányi, B. Takarics, B. Vanek et al. // IFAC-PapersOnLine. 2021. Vol. 54, iss. 12. P. 26–31. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.11.005>.

16. Павловский Ю. Н., Белотелов Н. В., Бродский Ю. И. Имитационное моделирование. Москва: Академия, 2008. 236 с.

17. Кобелев Н. Б. Введение в общую теорию имитационного моделирования. Пособие для разработчиков имитационных моделей и их пользователей. М.: Пинт-Сервис, 2007. 126 с.

18. Горохов А. В. Системный анализ: лабораторный практикум. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2015. 56 с.

19. Powersim 2.5 Reference Manual. Herndon, USA: Powersim Press, 1996, 427 p.

20. Borshchev, A. The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with Anylogic 6. AnyLogic North America, 2013. 614 p.

21. Применение математики в экономических исследованиях / под ред. В. С. Немчинова. Москва: Соцэкгиз, 1959. Т. 1. 488 с.

22. Применение математики в экономических исследованиях / под ред. В. С. Немчинова. Москва: Соцэкгиз, 1961. Т. 2. 535 с.

23. Forrester J. W. Industrial Dynamics. Portland: Productivity Press, 1961. 464 p.

References

1. Peregudov F. I., Tarasenko F. P. Vvedenie v sistemnyj analiz = Introduction to System Analysis. Moscow: Vysshaja shkola; 1989. 367 p. (In Russ.).

2. Solso R. Kognitivnaja psihologija = Cognitive psychology. Sankt-Peterburg: Piter; 2002. 592 p. (In Russ.)

3. Solodovnikov V. V., Tumarkin. V. I. Teorija slozhnosti i proektirovanie sistem upravlenija = Complexity theory and control systems design. Moscow: Nauka; 1990. 168p. (In Russ.)

4. Sterman J. D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Boston: Irwin/McGraw-Hill; 2000. XXVI, 982 p.

5. Konstantinov E. V., Timchenko V. S. *Primenenie-imitatsionnogo-modelirovaniya-v-uchebnom-protseste-transportnogo-vuza* = Application of simulation modeling in the educational process of a transport university. *Mir nauki. Pedagogika i psihologija* = The world of science. Pedagogy and Psychology. 2015; 3. [cited: 2024 Aug 09]. Available from: <https://mir-nauki.com/PDF/42PDMN315.pdf>.

6. Gordienko T. P., Marchenko S. G. *Imitacionnoe modelirovanie kak perspektivnyj metod povysheniya kachestva obrazovaniya*. *Sovremennoe pedagogicheskoe obrazovanie* = Modern pedagogical education. 2023; 4 p. 24–28. (In Russ.) [cited: 2024 Aug 09]. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-kak-perspektivnyy-metod-povysheniya-kachestva-obrazovaniya>.

7. Vlasov D. A., Sinchukov A. V. *Imitacionnoe issledovanie teoretiko-igrovyyh modelej na osnove wolfram-tehnologij. Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie* = Modern Information Technology and IT Education. 2020; 1. (In Russ.) [cited: 2024 Aug 09] <https://doi.org/10.25559/SITITO.16.202001.235-245>

8. Chernikova O., Heitzmann N., Stadler M. Holzberger D., Seidel T., Fischer F. Simulation-Based Learning in Higher Education: A Meta-Analysis. *Review of Educational Research*. 2020. <https://doi.org/10.3102/0034654320933544>

9. Campbell K. K., Wong K. E., Kerchberger A. M., Lysikowski J., Scott D. J., Sulistio M. S. Simulation-Based Education in US Undergraduate Medical Education: A Descriptive Study. *Simulation in Healthcare: The Journal of the Society for Simulation in Healthcare*. 2023. 18 (6): p. 359–66, December 2023. <https://doi.org/10.1097/SIH.0000000000000705>

10. Lehtinen E. Can simulations help higher education in training professional skills?. *Learning and Instruction*. 2023; (86), 101772, [cited: 2024 Aug 09] <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2023.10177>

11. Krunal J. S., Mehta A., Panda S. R., Panchal H., Sinha R. Practical exercises of computer-aided process synthesis for chemical engineering undergraduate. *Education for Chemical Engineers*. 2024 (48); 31-43, [cited: 2024 Aug 09]. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2024.04.002>

12. Kong Z. Y., Abdul Aziz Omar, Sian Lun Lau, Sunarso J. Introducing process simulation as an alternative to laboratory session in undergraduate chemical engineering thermodynamics course: A case study from Sunway University Malaysia. *Digital Chemical Engineering*. 2024(12);100167. [cited: 2024 Aug 09]. <https://doi.org/10.1016/j.dche.2024.100167>

13. Campos N., Nogal M., Caliz C. et al. Simulation-based education involving online and on-campus models in different European universities. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*. 2020. 17; 8. [cited: 2024 Aug 09] <https://doi.org/10.1186/s41239-020-0181-y>

14. Hubalovsky S. System Approach, Modeling, Simulation as Educational Technologies in Algorithm Development and Programming. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2015 [cited: 2024 Aug 09]; (191): 226-2230. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.04.267>

15. Mocsányi R. D., Takarics B., Vanek B. et al. Control-oriented Aircraft Modelling and Analysis Framework for Educational Purposes. *IFAC-PapersOnLine*. 2021; 54 (12): 26-31 [cited: 2024 Aug 09]. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.11.005>
16. Pavlovskij Ju. N., Belotelov N. V., Brodskij Ju. I. Imitacionnoe modelirovanie = Simulation modeling. Moscow: Akademija; 2008. 236 p. (In Russ.).
17. Kobelev N. B. Vvedenie v obshhuju teoriju imitacionnogo modelirovanija. Posobie dlja razrabotchikov imitacionnyh modelej i ih pol'zovatelej = Introduction to the general theory of simulation modeling. A manual for developers of simulation models and their users. Moscow: Pint-Servis; 2007. 126 p. (In Russ.).
18. Gorokhov A. V. Sistemnyj analiz: laboratornyj praktikum = Systems Analysis: Laboratory Workshop. Joshkar-Ola: PGTU; 2015. 56 p. (In Russ.).
19. Powersim 2.5 Reference Manual. Herndon, USA: Powersim Press, 1996. 427 p.
20. Borshchev A. The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with Anylogic 6. AnyLogic North America; 2013. 614 p.
21. Nemchinov V. S. (Ed.). Primenenie matematiki v jekonomicheskikh issledovanijah = The Application of Mathematics in Economic Research. Moscow: Publishing House of Socio-Economic Literature; 1959. Vol. 1. 488 p. (In Russ.).
22. Nemchinov V. S. (Ed.). Primenenie matematiki v jekonomicheskikh issledovanijah = The Application of Mathematics in Economic Research. Moscow: Publishing House of Socio-Economic Literature; 1961. Vol. 2. 535 p. (In Russ.).
23. Forrester J. W. Industrial Dynamics. Portland, OR: Productivity Press; 1961. 464 p.