

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ

Клименко Ольга Анатольевна

К.ф.-м.н., с.н.с.

Институт вычислительных технологий СО РАН,  
630090 г. Новосибирск, пр. Лаврентьева 6, e-mail: klimenko@ict.nsc.ru

**Аннотация.** Проникновение информационных и телекоммуникационных технологий в промышленность, сельское хозяйство, медицину, образование, логистику и другие области человеческой деятельности привели к возникновению цифровой экономики. В статье выполнен обзор математических задач, роль которых очень возросла за последнее десятилетие в связи с тенденцией всеобщей цифровизации. В целом, можно выделить два больших класса задач: построение математических моделей или цифровых двойников реальных объектов (природных и искусственных) и задача обработки больших объемов данных.

**Ключевые слова:** Цифровая экономика, большие данные, цифровые двойники

**Цитирование:** Клименко О.А. Математические основы цифровой экономики // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. №2 (10). С. 121–127. DOI:10.25729/2413-0133-2018-2-12

**Введение.** Определение цифровой экономики дано в Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 - 2030 годы: «Цифровая экономика - хозяйственная деятельность, в которой ключевым фактором производства являются данные в цифровом виде, обработка больших объемов и использование результатов анализа которых, по сравнению с традиционными формами хозяйствования позволяют существенно повысить эффективность различных видов производства, технологий, оборудования, хранения, продажи, доставки товаров и услуг» [7]. Таким образом, задачи обработки больших объемов данных и использование цифровых данных для повышения эффективности производства лежат в основе цифровой экономики и определяют круг фундаментальных научных задач.

**1. Индустрия 4.0.** Возникновение цифровой экономики связывают с Четвертой промышленной революцией. Термин «Индустрия 4.0» или «Четвертая промышленная революция» был предложен в 2011 году на Ганноверской ярмарке в Германии [16]. В октябре 2012 года Рабочая группа по Индустрии 4.0 представила федеральному правительству Германии ряд рекомендаций по оцифровке отраслей промышленности. Под Индустрией 4.0 стал пониматься переход на полностью автоматизированное цифровое производство, управляемое интеллектуальными системами в режиме реального времени в постоянном взаимодействии с внешней средой, выходящее за границы одного предприятия, с перспективой объединения в глобальную промышленную сеть Вещей и сервисов.

Технологическая основа очередной промышленной революции обеспечивается интеллектуальными системами и сетью передачи данных, которые позволяют в значительной степени управлять производственными процессами. В мире Индустрии 4.0

люди, машины, оборудование, логистические системы и продукты общаются и взаимодействуют друг с другом напрямую. Производственные и логистические процессы интеллектуально интегрируются в единую систему, что позволяет сделать производство более эффективным и гибким.

**2. Цифровые двойники.** Численное, или математическое моделирование уже давно используется для усовершенствования конструкции изделий или рабочих процессов. Кроме того, математическое моделирование используется для анализа различных стратегий управления, позволяющих повысить эффективность работы устройств или бизнес-процессов компаний. С появлением Интернета вещей в численную модель продукта или процесса закладывается связь с другими объектами с помощью информации, которая поступает от всевозможных датчиков. В результате формируются так называемые цифровые двойники физических объектов, которые могут быть использованы для анализа и диагностики их работы, а также оптимизации производительности и обслуживания в режиме реального времени.

С математической точки зрения, цифровые двойники представляют собой системы математических уравнений (алгебраических, дифференциальных, интегральных, разностных и др.) связанные между собой граничными и начальными условиями. Как правило, цифровой двойник имеет двумерную или трехмерную визуализацию, которая зависит от времени.

Сложные задачи математического и компьютерного моделирования, которые имеют приложения в промышленности, решаются в Институте вычислительных технологий СО РАН, Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Институте динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН и в других институтах СО РАН [2, 4, 11]. Например, на рис. 1 представлены результаты моделирования рабочего колеса гидротурбины, выполненные в лаборатории математического моделирования Института вычислительных технологий СО РАН [15].

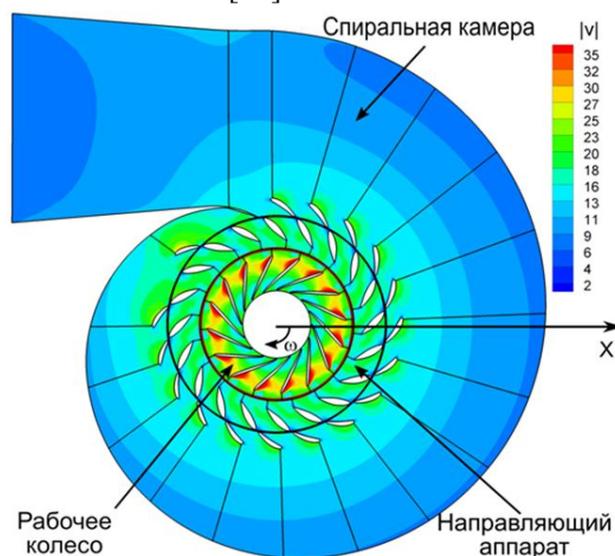


Рис. 1. Моделирование рабочего колеса гидротурбины

**3. Бионический дизайн.** Новшеством последних лет является то, что математическое или цифровое моделирование стало использоваться на этапе проектирования изделия. Если раньше форма изделия была существенно ограничена свойствами материала и

возможностями станков, то с возникновением аддитивных технологий границы существенно отодвинулись. Появилась техническая возможность создавать конструкции с помощью нового подхода – бионического дизайна. Обычно под этим термином понимается оптимизация геометрической формы и других параметров изделия для снижения веса, при сохранении прочности. Такие задачи возникают, например, при проектировании самолетов и космических аппаратов. В результате многопараметрической оптимизации возникают модели непривычной формы с полостями, ячейками, которые могут напоминать биологические объекты, например, строение кости, листка дерева, соты, паутину.

На рис. 2 представлено автомобильное кресло, разработанное Toyota Motor Corporation и Toyota Central R&D Labs Inc. совместно с бельгийской компанией Materialise [13]. Кресло весит 7 кг вместо 25 кг при сохранении или улучшении других характеристик.

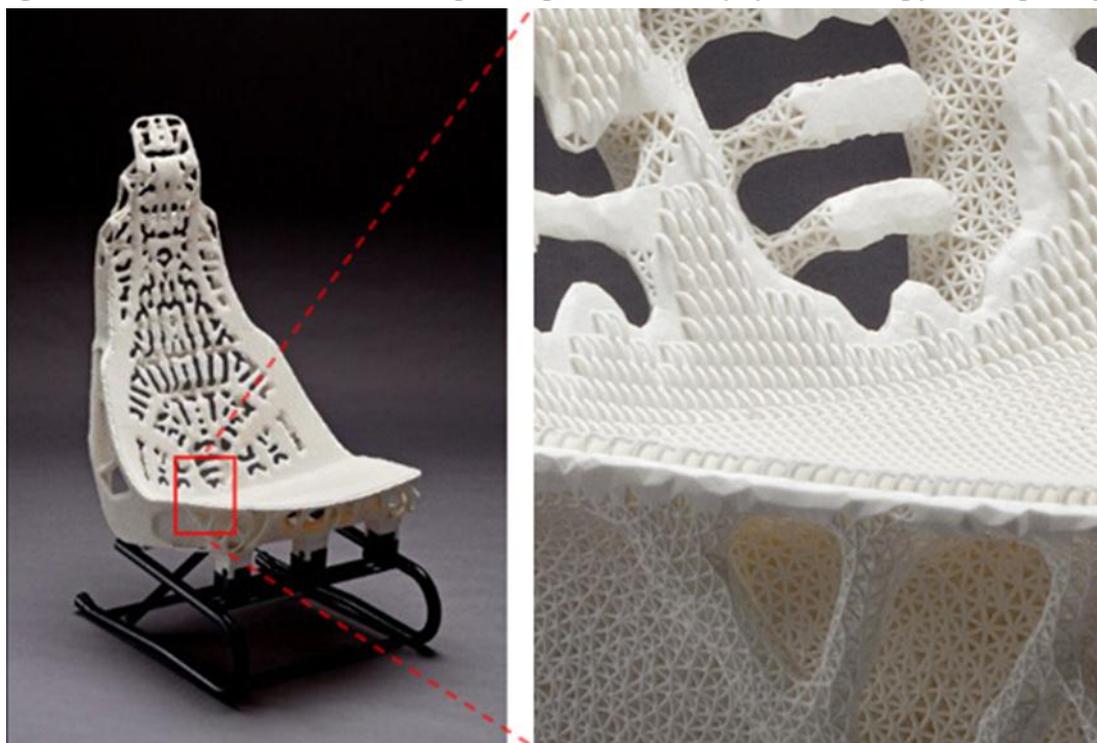


Рис. 2. Прототип бионического автомобильного кресла, напечатанного на 3D-принтере

В России одним из ведущих центров, где развиваются методы бионического дизайна, является Инжиниринговый центр «Центр компьютерного инжиниринга» (CompMechLab®) Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого [3]. В Центре занимаются математическим моделированием и компьютерным инжинирингом материалов, композитных структур, физико-механических и технологических процессов, современных машин и конструкций. Проректор по перспективным проектам СПбПУ, руководитель Инжинирингового центра СПбПУ, профессор А.И. Боровков является лидером рабочей группы «Технет» НТИ, а также входит в состав рабочей группы экономического совета при президенте России по направлению "Цифровая экономика".

**4. Большие данные.** Понятие «большие данные» является относительным и все время развивается [6]. Источниками возникновения больших данных могут быть : видео с камер наблюдения, метеорологические и астрономические данные, данные дистанционного зондирования Земли, данные физики больших энергий, потоки сообщений из социальных сетей, потоки данных о местонахождении абонентов сетей сотовой связи и др.

Примерно с 2009 года объем данных растет быстрее роста вычислительных мощностей. Старые математические методы могут не работать на больших данных. Например, становится затруднительным посчитать среднее арифметическое миллиарда чисел, обратить матрицу миллион на миллион для решения системы алгебраических уравнений.

Для анализа больших данных используются теория вероятностей, математическая статистика, параллельное программирование, машинное обучение, концепция нейронных сетей.

Байесовский подход (Bayesian Framework) оказался эффективным для больших данных, при этом подходе все величины интерпретируются как случайные. Вероятность определяется как степень уверенности в истинности суждения. Байесовские методы в зависимости от входных данных выдают апостериорную вероятность быть адекватной для каждой из гипотез. Метод заключается в обработке блока данных, получении апостериорной информации и использовании этой информации как априорной при обработке следующего блока информации.

В последние годы байесовские методы стали активно использоваться в комбинации с нейросетевыми моделями, чтобы повысить их предсказательную способность, облегчить процесс настройки под конкретные данные, а также, чтобы решить более широкий круг задач: например, осуществить классификацию изображений или музыки, перенести художественный стиль с картины на фотографию, предсказывать следующие слова в тексте.

В России новые способы исследования больших данных развивают, в частности, в Центре глубинного обучения и байесовских методов [8, 14]. Возглавляет Центр профессор Д.П. Ветров. Центр является подразделением Факультета компьютерных наук Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики».

В Сибирском отделении РАН методы работы с большими данными развиваются в Институте математики им. С.Л. Соболева СО РАН и Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН.

Важной задачей цифровой трансформации является интеллектуальное планирование транспортных потоков. Это направление уходит своими корнями к классической задаче коммивояжера. В задачах маршрутизации транспортных средств мы имеем дело сразу с несколькими коммивояжерами и дополнительными ограничениями на допустимые маршруты: временные окна для обслуживания клиентов, ограниченность грузоподъемности транспортного средства, рабочий график водителей и др. Трудные и разнообразные задачи оптимизации успешно решаются в Институте математики им. С.Л. Соболева СО РАН, Институте систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН [9, 10, 1, 5, 12].

**Заключение.** Широкое и глубокое проникновение информационных и телекоммуникационных технологий во все сферы деятельности человека привело к развитию новых методов математики, в первую очередь для обработки гигантских объемов информации. Для оцифровки промышленных процессов и объектов используются системы уравнений разного вида, связанные между собой граничными и начальными условиями и зависящие от времени. Поиск оптимального (лучшего) решения теперь не ограничен жесткими формами. Применение аддитивных технологий позволяет искать решения непривычной формы и с использованием новых материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айзенберг Н.И., Зоркальцев В.И., Мокрый И.В. Исследование нестационарных олигопольных рынков // Сиб. журн. индустр. матем. 2017. Т.20. №1. С. 11–20.
2. Артемьев С.С., Марченко М.А., Корнеев В.Д., Якунин М.А. и др. Анализ стохастических колебаний методом Монте-Карло на суперкомпьютерах. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2016. 294 с.
3. Боровков А.И., Марусева В.М., Рябов Ю.А., Щербина Л.А. Бионический дизайн. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та. 2015. 92 с.
4. Годунов С.К., Киселев С.П., Куликов И.М., Мали В.И. Моделирование ударно-волновых процессов в упругопластических материалах на различных (атомный, мезо и термодинамический) структурных уровнях. Москва, Ижевск: Из-во Ижевского института компьютерных исследований. 2014. 296 с.
5. Зоркальцев В.И., Пержабинский С.М. Модели оценки дефицита мощности электроэнергетической системы // Сиб. журн. индустр. матем. 2012. Т. 15. №1. С. 34 – 43
6. Майер-Шенбергер В., Кукьер К. Большие данные. Революция, которая изменит то, как мы живем, работаем и мыслим. М.: Манн, Иванов и Фербер. 2014. 230 с.
7. Указ Президента РФ от 9 мая 2017 г. № 203. <http://kremlin.ru/acts/bank/41919>
8. Фигурнов М.В., Струминский К.А., Ветров Д.П. Устойчивый к шуму метод обучения вариационного автокодировщика // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. 2017. Т. 21. № 2. С. 90 – 109.
9. Davydov I., Kochetov Yu. VNS-based heuristic with an exponential neighborhood for the server load balancing problem // Electronic Notes in Discrete Mathematics. 2015. Vol. Pp. 53–60 DOI: 10.1016/j.endm.2014.11.008
10. Iellamo S., Alekseeva E., Chen L., Coupechoux M., Kochetov Yu. Competitive location in cognitive radio networks // 4OR. 2015. Vol. 13. Issue 1. Pp. 81–110. DOI: 10.1007/s10288-014-0268-1
11. Kabanikhin S.I., Novikov N.S., Oseledets I.V., Shishlenin M.A. Fast Toeplitz linear system inversion for solving two-dimensional acoustic inverse problem // J. of Inverse and Ill-Posed Problems. 2015. Vol. 23. No. 6. Pp. 687–700.
12. Massel L.V., Massel A.G. Intelligent system of semiotic type for decision-making support in Russia energy sector based on situational management conception /Proceedings of IV International scientific conference "Information technologies in science, management, social sphere and medicine" (ITSMSSM 2017)) // Advances in Computer Science Research (ACSR). Volume 72. 2017. Pp. 423–429. Available at: <https://www.atlantispress.com/proceedings/itsmssm-17>
13. Materialise Slicing Technology Enables Toyota's Lightweight Car Seat. Available at: <http://www.materialise.com/en/cases/materialise-slicing-technology-enables-toyota%E2%80%99s-lightweight-car-seat>.
14. Molchanov D., Ashukha A., Vetrov D. Variational Dropout Sparsifies Deep Neural Networks // Proceedings of Machine Learning Research. Proceedings of the International Conference on Machine Learning (ICML 2017). Vol. 70. Sydney: 2017. Pp. 2498 – 2507.

15. Shokin Y.I., Cherny S.G., Esipov D.V., Lapin V.N., Lyutov A.E., Kuranakov D.S. Three-dimensional model of fracture propagation from the cavity caused by quasi-static load or viscous fluid pumping // Communications in Computer and Information Science. 2015. Vol. 549. Pp. 143–157. ISSN 1865-0929. EISSN 1865-0937.
16. What is Industrie 4.0? Available at: <http://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/EN/Industrie40/WhatIsIndustrie40/what-is-industrie40.html>

---

**UDK 004.738.5**

## MATHEMATICAL FOUNDATIONS OF THE DIGITAL ECONOMY

**Olga A. Klimenko**

Ph.D. Senior Research Fellow

Institute of Computational Technologies SB RAS,

630090 Novosibirsk, Lavrentiev avenue 6, e-mail: [klimenko@ict.nsc.ru](mailto:klimenko@ict.nsc.ru)

**Abstract.** The penetration of information and telecommunication technologies into industry, agriculture, medicine, education, logistics and other areas of human activity resulted in the emergence of the digital economy. A review of mathematical problems, the role of which has greatly increased over the past decade due to total digitalization, is carried out in this article. In general, we can define two major types of problems - the construction of mathematical models or digital twins of physical objects (both natural and artificial) and the task of processing large amounts of data.

**Keywords:** Digital Economy, big data, digital twins

### References

1. Ayzenberg N.I., Zorkaltsev V.I., Mokryiy I.V. Issledovanie ne tatsionarnyih oligo-polnyih ryinkov [Investigation of unsteady oligopolistic markets] // Sibirskii Zhurnal Industrial'noi Matematiki = Journal of Applied and Industrial Mathematics. 2017. T.20. no 1. Pp. 11–20 (in Russian)
2. Artemev S.S., Marchenko M.A., Korneev V.D., Yakunin M.A. i dr. Analiz stohasticheskih kolebaniy metodom Monte-Karlo na superkompyuterah [Analysis of stochastic oscillations by the Monte Carlo method on supercomputers]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN = Publishing House SB RAS. 2016. 294 p. (in Russian)
3. Borovkov A.I., Maruseva V.M., Ryabov Yu.A., Scherbina L.A. Bionicheskiy dizayn [Bionic design]. St. Petersburg. Izd-vo Politehnicheskogo un-ta = Publishing house of SPbSTU. 2015. 92 p.
4. Godunov S.K., Kiselev S.P., Kulikov I.M., Mali V.I. Modelirovanie udarno-volnovyih protsessov v uprugoplasticheskikh materialah na razlichnyih (atomnyiy, mezo i termodinamicheskiy) strukturnyih urovnyah [Modeling of shock-wave processes in elastoplastic materials at various (atomic, meso- and thermodynamic) structural levels]. Moskow. Izhevsk: Iz-vo Izhevskogo instituta kompyuternyih issledovaniy = Moscow. Izhevsk Institute of Computer Science Publ. 2014. 296 p. (in Russian)

5. Zorkaltsev V.I., Perzhabinskiy S.M., Modeli otsenki defitsita moschnosti elektroenergeticheskoy sistemyi [Models for assessing the electricity deficit in the power system] // Sibirskii Zhurnal Industrial'noi Matematiki = Journal of Applied and Industrial Mathematics. 2012. T. 15. no 1. Pp. 34–43 (in Russian)
6. Mayer-Shenberger V., Kukyer K. Bolshiye dannyye. Revolyutsiya, kotoraya izmenit to, kak my zhivem, rabotayem i myslim [Big Data. A Revolution That Will Transform How We Live, Work, and Think]. M.: Mann, Ivanov i Ferber = MIF Publ. 2014. 230 p.
7. Ukaz Prezidenta RF ot 9 maya 2017 g. № 203. [Decree of the President of the Russian Federation of May 9, 2017 No. 203.]. Available at: <http://kremlin.ru/acts/bank/41919> (in Russian)
8. Figurnov M.V., Struminskiy K.A., Vetrov D.P. Ustoychivyy k shumy metod obucheniya variatsionnogo avtokodirovschika [Stability-to-noise method of learning the variational autocoder] // Intellectualnyie sistemyi. Teoriya i prilozheniya = Intellectual systems. Theory and applications. 2017. T. 21. No 2. Pp. 90–109. (in Russian)
9. Davydov I., Kochetov Yu. VNS-based heuristic with an exponential neighborhood for the server load balancing problem // Electronic Notes in Discrete Mathematics. 2015.Vol. Pp. 53–60. DOI: 10.1016/j.endm.2014.11.008
10. Iellamo S., Alekseeva E., Chen L., Coupechoux M., Kochetov Yu. Competitive location in cognitive radio networks // 4OR. 2015. Vol. 13. Issue 1. Pp. 81–110. DOI: 10.1007/s10288-014-0268-1
11. Kabanikhin S.I., Novikov N.S., Oseledets I.V., Shishlenin M.A. Fast Toeplitz linear system inversion for solving two-dimensional acoustic inverse problem // J. of Inverse and Ill-Posed Problems. 2015. Vol. 23. no. 6. Pp. 687–700.
12. Massel L.V., Massel A.G. Intelligent system of semiotic type for decision-making support in Russia energy sector based on situational management conception /Proceedings of IV International scientific conference "Information technologies in science, management, social sphere and medicine" (ITSMSSM 2017)) // Advances in Computer Science Research (ACSR). Volume 72. 2017. Pp. 423–429. Available at: <https://www.atlantispress.com/proceedings/itsmssm-17>
13. Materialise Slicing Technology Enables Toyota's Lightweight Car Seat. Available at: <http://www.materialise.com/en/cases/materialise-slicing-technology-enables-toyota%E2%80%99s-lightweight-car-seat>.
14. Molchanov D., Ashukha A., Vetrov D. Variational Dropout Sparsifies Deep Neural Networks In bk.: Proceedings of Machine Learning Research. Proceedings of the International Conference on Machine Learning (ICML 2017). Vol. 70. Sydney: 2017. Pp. 2498–2507.
15. Shokin Y.I., Cherny S.G., Esipov D.V., Lapin V.N., Lyutov A.E., Kuranakov D.S. Three-dimensional model of fracture propagation from the cavity caused by quasi-static load or viscous fluid pumping // Communications in Computer and Information Science. 2015. Vol. 549. Pp.143–157. ISSN 1865-0929. EISSN 1865-0937.
16. What is Industrie 4.0? Available at: <http://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/EN/Industrie40/WhatIsIndustrie40/what-is-industrie40.html>