

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ РАН
CENTRAL ECONOMICS AND MATHEMATICS INSTITUTE RAS

РОССИЙСКАЯ
АКАДЕМИЯ НАУК

RUSSIAN
ACADEMY OF SCIENCES

ПРОБЛЕМЫ И ПОКАЗАТЕЛИ РАЗВИТИЯ РОБОТОТЕХНИКИ

Коллективная монография

Москва
2022

УДК 330.4, 330.354, 338.012
ББК 32.816
П78

DOI: 10.33276/978-5-8211-0806-7

П78 Проблемы и показатели развития робототехники [Текст]: монография / рук. авт. колл., отв. ред. А.Е. Варшавский. – М.: ЦЭМИ РАН, 2022. – 230 с. (Рус.)

Коллектив авторов: А.Е. Варшавский, М.Г. Дубинина, В.В. Дубинина, Т.А. Комкина, Е.В. Кочеткова, М.А. Никонова.

В монографии рассмотрены общие проблемы развития робототехники, дан анализ развития промышленных роботов, применяемых для выполнения различных операций, а также сервисных роботов, используемых в гражданских и военных областях. При этом большое внимание уделено анализу и моделированию взаимосвязи технико-экономических показателей, результаты которого могут быть использованы в дальнейшем для прогнозирования. Исследованы также тенденции и направления развития рынков и распространения роботов, проведены межстрановые сопоставления, позволившие выработать рекомендации по ускорению использования робототехники в России.

Ключевые слова: робототехника, промышленные роботы, сервисные роботы, технико-экономические показатели, плотность роботизации.

JEL: O14, O33.

Рецензенты: д.э.н., проф., научный руководитель лаборатории прикладной эконометрики ЦЭМИ РАН М.Ю. Афанасьев;
д.э.н., проф., зав. лабораторией ИНП РАН Н.И. Комков.

Problems and indicators of the robotics development [Text]: monograph / Head of the author's collective, responsible ed. A.E. Varshavsky. – M.: CEMI RAS, 2022. – 230 p. (Rus.)

The monograph considers the general problems of the development of robotics, analyzes the development of industrial robots used to perform various operations, as well as service robots used in civil and military fields. At the same time, much attention is paid to the analysis and modeling of the relationship of technical and economic indicators, the results of which can be used in the future for forecasting. The trends and directions of the development of markets and the diffusion of robots were also studied, cross-country comparisons were made, which made it possible to develop recommendations for accelerating the use of robotics in Russia.

Keywords: robotics, industrial robots, service robots, technical and economic indicators, robot density.

JEL: O14, O33.

УДК 330.4, 330.354, 338.012
ББК 32.816

ISBN 978-5-8211-0806-7

© Текст. Варшавский А.Е., Дубинина М.Г., Дубинина В.В., Комкина Т.А., Кочеткова Е.В., Никонова М.А., 2022 г.

© ФГБУН Центральный экономико-математический институт РАН, 2022 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ЧЕТВЕРТАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ РЕВОЛЮЦИЯ И РАЗВИТИЕ РОБОТОТЕХНИКИ.....	12
ГЛАВА 2. МИРОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ.....	31
ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ПЛОТНОСТИ РОБОТИЗАЦИИ В АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	60
ГЛАВА 4. СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ФАКТОРОВ РОБОТИЗАЦИИ в РОССИИ И ПОЛЬШЕ	65
ГЛАВА 5. ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ	82
ГЛАВА 6. АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ для ПАЛЛЕТИРОВАНИЯ, ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ И ПОКРАСКИ.....	99
ГЛАВА 7. АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗВИТИЯ РОБОТОВ для ДУГОВОЙ СВАРКИ (по ПОКОЛЕНИЯМ)	104
ГЛАВА 8. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ВОЕННЫХ БПЛА (на ПРИМЕРЕ БПЛА ИЗРАИЛЯ)	111
ГЛАВА 9. АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БПЛА ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ (на ПРИМЕРЕ БПЛА в СТРАНАХ ЕС)	121
ГЛАВА 10. НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКИХ И СТРАТОСФЕРНЫХ БПЛА	128
ГЛАВА 11. БПЛА ВЕРТОЛЕТНОГО ТИПА	135
ГЛАВА 12. АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗВИТИЯ ГИБРИДНЫХ БПЛА	143
ГЛАВА 13. АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КВАДРОКОПТЕРОВ	149
ГЛАВА 14. РОБОТИЗИРОВАННЫЕ ХИРУРГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ	160
ГЛАВА 15. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОНИКИ в МЕДИЦИНСКОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ ...	174
ГЛАВА 16. РАСШИРЕНИЕ СПРОСА НА ОТДЕЛЬНЫЕ ВИДЫ РОБОТОТЕХНИКИ в МЕДИЦИНЕ, ВЫЗВАННОЕ ЭПИДЕМИЕЙ КОРОНАВИРУСА	186
ГЛАВА 17. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РОБОТОВ в СТРОИТЕЛЬСТВЕ.....	193
ГЛАВА 18. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ АНТРОПОМОРФНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ.....	205
ГЛАВА 19. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СЕРВИСНЫХ РОБОТОВ для ДОМАШНЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ	225
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	230

CONTENTS

INTRODUCTION	5
CHAPTER 1. THE FOURTH INDUSTRIAL REVOLUTION AND THE DEVELOPMENT OF ROBOTICS	12
CHAPTER 2. GLOBAL TRENDS AND DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL ROBOTS	32
CHAPTER 3. ANALYSIS OF ROBOT DENSITY IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY	62
CHAPTER 4. A COMPARATIVE ANALYSIS OF INDICATORS AND FACTORS OF ROBOTIZATION IN RUSSIA AND POLAND	67
CHAPTER 5. PRINCIPAL TRENDS IN FEASIBILITY INDICATORS OF INDUSTRIAL ROBOTS	84
CHAPTER 6. ANALYSIS OF TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF INDUSTRIAL ROBOTS FOR PALLETIZING, SPOT WELDING AND PAINTING	101
CHAPTER 7. ANALYSIS OF THE INDICATORS OF ARC WELDING ROBOT'S DEVELOPMENT (BY GENERATIONS)	106
CHAPTER 8. TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF THE MILITARY UAVs DEVELOPMENT (ON THE EXAMPLE OF ISRAELI UAVs)	113
CHAPTER 9. ANALYSIS OF THE TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF CIVILIAN UAVs (ON THE EXAMPLE OF UAVs IN EU COUNTRIES)	123
CHAPTER 10. DIRECTIONS OF THE SPACE AND STRATOSPHERIC UAVs DEVELOPMENT	130
CHAPTER 11. ROTARY-WING UAVs	137
CHAPTER 12. ANALYSIS OF HYBRID UAVs DEVELOPMENT INDICATORS.....	145
CHAPTER 13. ANALYSIS OF THE TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF PROFESSIONAL QUADCOPTERS	152
CHAPTER 14. ROBOTIC SURGICAL SYSTEMS	163
CHAPTER 15. FEATURES OF THE USE OF BIONICS IN MEDICAL ROBOTICS	177
CHAPTER 16. EXPANSION OF DEMAND FOR CERTAIN TYPES OF ROBOTICS IN MEDICINE CAUSED BY THE CORONAVIRUS EPIDEMIC.....	189
CHAPTER 17. THE USE OF ROBOTS IN CONSTRUCTION	197
CHAPTER 18. TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF ANTHROPOMORPHIC ROBOTICS	210
CHAPTER 19. TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF SERVICE ROBOTS FOR HOME USE	231
CONCLUSION.....	236

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время роботы применяются во всех сферах экономики – в промышленности, энергетике, сельском хозяйстве, строительстве, в медицине, образовании, домашнем хозяйстве и т.д. Они используются для сварки и обработки материалов, для сбора урожая, проведения научных исследований, очистки отходов, дезинфекции больничных палат и выполнения хирургических операций, осуществления подводных исследований, в логистике, а также в военных целях. Ожидается, что их роль значительно возрастет при реагировании на кризисные ситуации, в том числе в случае эпидемий.

Использование робототехники позволяет, с одной стороны, повысить производительность, а с другой – компенсировать нехватку рабочей силы, что весьма актуально при неблагоприятной демографической ситуации в стране, а также способствовать решению проблем, связанных со старением населения. Вместе с тем существуют опасения, что в некоторых областях роботы приведут к потере рабочих мест.

В связи с этим возрастает роль исследований прогресса в робототехнике, а также в связанных с ней направлениях – в компьютерных и когнитивных науках, биологии, инженерии, математике, материаловедении и др., а также повышается значение междисциплинарных исследований.

Большое значение приобретает анализ и прогноз взаимосвязи технических характеристик и их влияния на цену роботов, а также исследование скорости распространения робототехники в зависимости от социально-экономических условий, характерных для развитых и развивающихся стран, анализ рынков различных видов роботов. Важным является и выбор мер по стимулированию разработки, производства и использования роботов, в том числе предоставление инвестиционных налоговых льгот. Вместе с тем необходима оценка возможных угроз, связанных с применением робототехники, так как ее развитие опережает развитие нормативной базы.

В первой части данной монографии рассмотрены общие проблемы развития робототехники и дан анализ развития промышленных роботов, применяемых для выполнения различных операций.

Во второй части монографии представлены проблемы развития сервисных роботов, используемых в гражданских и военных областях.

При этом в монографии большое внимание уделено анализу и моделированию взаимосвязи технико-экономических показателей, результаты которого могут быть использованы в дальнейшем для прогнозирования. Исследованы также тенденции и направления развития рынков и распространения роботов, проведены межстрановые сопоставления, позволившие выработать рекомендации по ускорению использования робототехники в нашей стране.

В главе 1 «Четвертая промышленная революция и развитие робототехники» рассмотрены общие проблемы развития робототехники, показатели рынка (мировые расходы на роботизацию, данные о рынке промышленных роботов, в том числе прогнозные показатели рынков основных типов промышленных роботов, компонентов роботов, а также рынка сервисных роботов), программы и направления развития робототехники в ведущих

странах, данные об использовании и производстве роботов за рубежом и в России. Показано, что при оценке перспектив развития робототехники в нашей стране необходимо также учитывать значительный уровень деиндустриализации экономики, неблагоприятную демографическую ситуацию и усиление глобальной нестабильности.

Проблемы развития промышленных роботов рассмотрены в главах 2–7.

В главе 2 «Мировые тенденции и направления развития промышленных роботов» выполнен анализ динамики мирового парка промышленных роботов (ПР), структуры парка роботов по регионам (Европа, Америка, Азия и Австралия), а также ежегодных объемов и структуры мировых продаж роботов, используемых в различных отраслях промышленности (автомобильной, пищевой, химической, электронной и др.). Были рассмотрены основные направления использования и задачи, выполняемые ПР в этих отраслях, а также проведен анализ динамики парка роботов в отраслях промышленности в различных странах (Япония, США, Южная Корея, Китай, Германия и др.). Проведенный анализ показал, что применение ПР обеспечивает снижение травматизма на рабочем месте, производственных затрат и повышение качества конечного продукта, производительности, гибкости и безопасности, что способствует значительному расширению их использования как в развитых, так и в развивающихся странах. Анализ показателей и проблем использования ПР в России показал, что в нашей стране более широкое применение ПР, также, как и развитие промышленного интернета вещей и осуществление эффективной цифровизации, возможно только на базе восстановления и дальнейшего развития машиностроения, электронной и многих других отраслей обрабатывающей промышленности.

В главе 3 «Анализ плотности роботизации в автомобильной промышленности» рассматривается зависимость плотности роботизации автомобильной промышленности США, Германии и Японии от макроэкономических показателей, а также дается анализ факторов, влияющих на применение и распространение ПР в автомобильной промышленности. В главе приведены результаты моделирования зависимости плотности роботизации в автомобильной промышленности от макроэкономических показателей.

В результате проведенного исследования выявлена положительная корреляция с ВВП на душу населения по ППП, долей затрат на НИОКР в ВВП, долей механизмов и транспортного оборудования в добавленной стоимости обрабатывающей промышленности. Кроме того, показано положительное влияние плотности роботизации в автомобильной промышленности на производство легковых автомобилей.

Исследование зависимости плотности роботизации от факторов экономического развития (доля обрабатывающей промышленности и экспорта, валовое накопление основного капитала, инвестиции и т.д.) проведено **в главе 4 «Сопоставительный анализ показателей и факторов роботизации в России и Польше»**. При этом приведены результаты моделирования взаимосвязи плотности роботизации с показателями экономического развития Польши. Показано, что в Польше плотность роботизации увеличивалась значительными темпами, благодаря росту объемов производства в промышленности, в первую очередь в обрабатывающей (производство автомобилей, электроники и др.), а также экспорта товаров и услуг. В Польше основными стимулами использования робототехники являются повышение производительности и снижение затрат, сокращение сроков поставок и повышение качества продукции.

Результаты моделирования для периода ускоренной роботизации производства в Польше позволяют приблизительно оценить скорость роботизации в зависимости от темпов экономического роста (показана положительная корреляция с добавленной стоимостью обрабатывающей промышленности и промышленности в целом, с добавленной стоимостью производства автомобилей, прицепов и запчастей, валовым накоплением основного капитала, экспортом товаров и услуг).

Отсюда делается вывод, что для повышения плотности роботизации в России необходимо также значительное повышение валового накопления основного капитала, объема промышленного производства, обрабатывающей промышленности, в первую очередь производства машин и оборудования, станкостроения и электронной промышленности, принятие мер по налоговому стимулированию, значительное повышение внимания к человеческому капиталу.

В главе 5 «Основные тенденции изменения технико-экономических показателей промышленных роботов» представлены результаты анализа тенденций развития ПР ведущих зарубежных компаний. С этой целью были рассмотрены закономерности изменения основных технико-экономических показателей (цена, масса, грузоподъемность, радиус действия, точность позиционирования) ПР большой, средней и малой грузоподъемности.

Целью исследования было выявление закономерностей в тенденциях изменения основных технико-экономических показателей промышленных роботов во времени, а также взаимосвязи между показателями в целях использования их в дальнейшем для оценки и прогнозирования показателей отечественной робототехники. Показано, что технико-экономические показатели ПР различных компаний изменяются в соответствии с общими тенденциями, о чем свидетельствует близость изменения основных технико-экономических показателей роботов компаний Fanuc и ABB в течение достаточно длительного периода времени. Во всех трех группах роботов различной грузоподъемности наблюдаются в целом рост цены, снижение массы и повышение точности позиционирования, при этом при росте грузоподъемности наблюдается повышение стоимости. Повышение точности позиционирования роботов большой грузоподъемности также ведет к росту их стоимости. Масса роботов, как правило, также повышается при росте грузоподъемности (характерно для всех роботов Fanuc и роботов большой грузоподъемности компании ABB) и радиуса действия. В то же время статистически значимая зависимость цены от точности роботов средней и малой грузоподъемности и от радиуса действия во всех трех группах роботов не была выявлена. Результаты проведенного анализа основных тенденций изменения технико-экономических показателей ПР, разработанных в последние десятилетия за рубежом, могут послужить ориентиром для оценки и прогноза показателей отечественной робототехники.

В главе 6 «Анализ технико-экономических показателей промышленных роботов для паллетирования, точечной сварки и покраски» проведено исследование технико-экономических показателей ПР для покраски, точечной сварки и паллетирования компаний Kuka, Fanuc и Yaskawa Motoman. Для этих роботов построены модели зависимости их цены от грузоподъемности, радиуса действия, точности позиционирования, массы, технического индекса. Полученные результаты в дальнейшем могут послужить для прогнозной оценки изменения цены при улучшении технических показателей ПР данного типа.

Глава 7 «Анализ показателей развития роботов для дуговой сварки (по поколениям)» посвящена анализу и моделированию технико-экономических показателей поколений роботов для дуговой сварки ведущих компаний-производителей роботов (Fanuc, Yaskawa Motoman, ABB и Kuka), выявлению основных направлений технологического развития этого вида роботов. Роботизированная дуговая сварка является одним из наиболее успешных применений ПР. Ее применение быстро расширяется (так, в 2017 г. отгрузки роботов для дуговой сварки выросли на 102% по сравнению с 2016 г.). Результаты исследования позволили выявить основные направления технологического развития рассмотренных моделей роботов для дуговой сварки: повышение максимальной угловой скорости по осям подвижности и точности позиционирования робота, сокращение времени цикла сварки, расширение диапазонов грузоподъемности и радиуса действия.

В главах 8–13 дан анализ развития беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

В главе 8 «Технико-экономический анализ развития военных БПЛА (на примере БПЛА Израиля)» анализируются основные технико-экономические показатели поколений различных видов военных БПЛА Израиля. Измерение и прогнозирование технологического прогресса в области систем вооружений необходимо для оценки потенциальных угроз. Израильские производители беспилотных авиационных систем вкладывают огромные средства в разработку БПЛА для сохранения своего преимущества над конкурентами. Эти средства направляются на улучшение возможностей БПЛА, состоящих на вооружении израильской армии, а также на разработку БПЛА, поставляемых на экспорт. БПЛА новых поколений характеризуются развитием и совершенствованием авионики, систем связи и обработки информации, средств радиоэлектронной борьбы и других систем, что способствует улучшению их технико-экономических показателей.

В главе 9 «Анализ технико-экономических показателей БПЛА гражданского назначения (на примере БПЛА в странах ЕС)» показано, что производство и использование коммерческих и гражданских БПЛА в последние годы становится объектом повышенного внимания широкой общественности. Ускоренное развитие технологий БПЛА, расширение спектра предлагаемых услуг свидетельствует о высоком потенциале этого рынка. В главе анализируется современное состояние рынка БПЛА в странах ЕС, особенности развития, а также существующие и перспективные направления их использования. Проведен анализ технико-экономических показателей моделей гражданских БПЛА на примере компании Lehmann Aviation.

В главе 10 «Направления развития космических и стратосферных БПЛА» дан обзор современных разработок космических и стратосферных БПЛА (Unmanned space vehicles, USV), их видов, способов использования и перспектив дальнейшего развития в разных странах. В настоящее время ряд стран проводит исследования и разрабатывает собственные космические БПЛА. Космические и стратосферные БПЛА открывают новые возможности для человечества, как в области исследования других планет, так и для улучшения жизни на Земле. Однако использование их в военных целях, размещение на них вооружения может привести к непредсказуемым последствиям.

Глава 11 «БПЛА вертолетного типа» посвящена рассмотрению БПЛА с вращающимся крылом, которые имеют очень широкий диапазон применения. Они чаще, чем летательные аппараты с фиксированным крылом, используются для исследований в области

авиационной робототехники, инспекции объектов и т.п. в течение длительного времени. Наиболее широко БПЛА вертолетного типа используются в сельском хозяйстве, что показано в главе на примере японских БПЛА (в настоящее время в Японии используется для мониторинга, посева и опрыскивания сельскохозяйственных культур около 2400 беспилотников вертолетного типа). Развитие БПЛА вертолетного типа направлено на увеличение времени и продолжительности полета, снижение энергопотребления в расчете на 1 км дальности полета. При этом, как показано в главе, растет отношение массы полезной нагрузки к диаметру ротора, а также улучшаются другие технические показатели.

Результаты анализа технических показателей гибридных БПЛА приведены в **главе 12 «Анализ показателей развития гибридных БПЛА»**. В общем случае гибридные БПЛА делятся на два основных типа: конвертопланы (convertiplane) – летательные аппараты с изменяющимся положением крыла, ротора или двигателя для изменения вертикального вектора тяги в момент взлета или посадки на горизонтальное во время полета; БПЛА вертикального взлета и посадки, выполняющих горизонтальный полет (tail-sitter). В частности, показано, что у гибридных БПЛА удельная цена снижается с увеличением размаха крыла и со временем первого полета модели, причем цена единицы комплексного показателя технического уровня гибридных БПЛА ниже, чем у БПЛА с фиксированным крылом, что свидетельствует об эффективности аппаратов этого типа.

В **главе 13 «Анализ технико-экономических показателей профессиональных квадрокоптеров»** рассмотрены показатели профессиональных квадрокоптеров, которые, в отличие от любительских, обладают более высокой грузоподъемностью, улучшенной системой крепления полезных грузов, большей дальностью и временем полета, устойчивостью к ветру, наличием режима автоматического полета. По своей максимальной массе они относятся к классу мини- или микро-БПЛА. В главе проведен анализ основных направлений технического развития двух групп профессиональных квадрокоптеров, для каждой группы разработан комплексный показатель технического уровня, построены модели цены и удельной цены квадрокоптеров относительно этого показателя. Для малоразмерных профессиональных квадрокоптеров оценены зависимости абсолютных и относительных технических показателей от времени и по поколениям. Результаты анализа и моделирования показывают, что развитие малоразмерных профессиональных квадрокоптеров направлено в сторону увеличения максимальной взлетной массы, скорости полета, а также уменьшения показателя мощности на единицу максимальной взлетной массы.

В главах 14–16 рассмотрены проблемы и показатели развития медицинских роботов.

В **главе 14 «Роботизированные хирургические системы»** проведен анализ мирового рынка медицинских роботов. В мировой медицинской практике нашли широкое применение различные типы роботов: для восстановительной медицины и реабилитации; для жизнеобеспечения; для диагностики, терапии и хирургии. В настоящее время наиболее быстро растущим сегментом являются хирургические роботизированные системы. Потребность в этих системах обусловлена в настоящее время спросом на минимально инвазивные операции. В главе выделены поколения хирургической системы da Vinci, которая является доминирующей на мировом рынке медицинской хирургической робототехники. Также проведен анализ динамики основных показателей деятельности компании Intuitive и

рассмотрены особенности распространения хирургической системы da Vinci в различных странах. Показана необходимость учета, как этических проблем, так и проблем безопасности при применении медицинских роботов.

Особенности развития рынка бионических роботизированных медицинских систем рассмотрены в главе 15 «Особенности использования бионики в медицинской робототехнике», где проведен анализ опыта и практических результатов их применения. При этом представлены результаты анализа поколений и взаимосвязи показателей на примере бионических протезов рук.

В главе 16 «Расширение спроса на отдельные виды робототехники в медицине, вызванное эпидемией коронавируса» проведен анализ особенностей развития высокотехнологичной медицинской робототехники с учетом последних разработок на фоне пандемии COVID-19. Показывается, что применение робототехники в медицинских учреждениях решает такие важные задачи, как уменьшение риска распространения вирусов, снижение нагрузки на медицинский персонал, сокращение времени обработки помещений и улучшение качества дезинфекции помещений. Роботизированные системы облегчают выполнение рутинных процедур в медицинских учреждениях, могут работать непрерывно, обеспечивая при этом высокую производительность, что в свою очередь, позволяет увеличить их пропускную способность, повысить качество и минимизировать затраты на лечение.

В главах 17–19 рассматриваются различные виды роботов для строительства, анализируются тенденции развития антропоморфных роботов и показатели роботов, используемых в домашнем хозяйстве.

В главе 17 «Использование роботов в строительстве» анализируются существующие и перспективные виды строительных роботов, дается их классификация и приводятся примеры новейших разработок (демонтажные роботы, роботы-укладчики кирпичей и цемента, роботы-помощники на стройке, роботы для инспекции тоннелей, системы дополненной реальности для строительства, экзоскелеты для строителей, роботы-инспекторы и строители мостовых сооружений, мини-роботы – сварщики и роботы-краны). Рассмотрены также возможности и перспективы применения робототехники при возведении зданий и инспекции гражданской инфраструктуры.

Основные этапы развития антропоморфных роботов рассмотрены в главе 18 «Тенденции развития антропоморфной робототехники», где проанализированы технико-экономические показатели таких роботов, а также исследованы основные тенденции развития рынка и вероятные риски их внедрения. Показано, что развитие антропоморфной робототехники характеризуется в настоящее время тенденцией перехода от совершенствования технических характеристик, определяемого в большей степени развитием компонентной базы, к обеспечению возможности воспроизведения интеллекта, поведения, эмоционального и социального взаимодействия, а также увеличением автономности.

В главе 19 «Технико-экономические показатели сервисных роботов для домашнего использования» проводился анализ технико-экономических показателей роботов-пылесосов, производимых российской фирмой «Китфорт».

Авторы монографии: введение – д.э.н., к.т.н. А.Е. Варшавский; глава 1 – д.э.н., к.т.н. А.Е. Варшавский; глава 2 – д.э.н., к.т.н. А.Е. Варшавский, В.В. Дубинина; глава 3 – В.В. Дубинина; глава 4 – д.э.н., к.т.н. А.Е. Варшавский, В.В. Дубинина; глава 5 – д.э.н.,

к.т.н. А.Е. Варшавский, В.В. Дубинина; глава 6 – В.В. Дубинина; глава 7 – М.Г. Дубинина; глава 8 – М.Г. Дубинина; глава 9 – М.Г. Дубинина; глава 10 – М.Г. Дубинина; глава 11 – М.Г. Дубинина; глава 12 – М.Г. Дубинина; глава 13 – М.Г. Дубинина; глава 14 – к.э.н. Т.А. Комкина; глава 15 – к.э.н. Т.А. Комкина; глава 16 – к.э.н. Т.А. Комкина; глава 17 – М.Г. Дубинина; глава 18 – к.э.н. Е.В. Кочеткова; глава 19 – к.э.н. М.А. Никонова; заключение – д.э.н., к.т.н. А.Е. Варшавский.

ГЛАВА 1.

ЧЕТВЕРТАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ РЕВОЛЮЦИЯ И РАЗВИТИЕ РОБОТОТЕХНИКИ

ВВЕДЕНИЕ

Развитие робототехники является приоритетным направлением для инновационной индустриализации России не только в долгосрочной, но уже и в краткосрочной перспективе. Робототехника, по-видимому, может стать локомотивом и для общего экономического роста, учитывая, что наиболее передовые развитые страны в настоящее время создают у себя роботизированные предприятия и переводят к себе производства из развивающихся стран.

Важно подчеркнуть, что Четвертая промышленная революции Industry 4.0 во многом опирается на развитие робототехники. В этой связи целесообразно проанализировать показатели рынка (мировые расходы на роботизацию, данные о рынке промышленных роботов, в том числе прогнозные показатели рынков основных типов промышленных роботов, компонентов роботов, а также рынка сервисных роботов), программы и направления развития робототехники в ведущих странах, а также данные об использовании и производстве роботов за рубежом и в России. При оценке перспектив развития робототехники в нашей стране необходимо также учитывать значительный уровень деиндустриализации экономики, неблагоприятную демографическую ситуацию в России и усиление глобальной нестабильности. Глава подготовлена на основе статьи автора*.

ЧЕТВЕРТАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ РЕВОЛЮЦИЯ INDUSTRY 4.0

Термин Industry 4.0 означает четвертую промышленную революцию, которая предполагает комплексную трансформацию всех отраслей промышленности путем сопряжения цифровых технологий и интернета с традиционными производствами. Все производственные звенья (поставщики, предприятие–изготовитель продукции, дистрибьюторы, сам продукт) объединяются при этом на основе цифровизации процессов в интегрированную цепочку создания стоимости. Industry 4.0 предполагает: изменение процесса производства (интеграция машин, складских систем и производственных мощностей в киберфизические системы, существенное повышение гибкости, эффективности и производительности на «умных» предприятиях); а также изменение характера труда на предприятиях (ожидается, что рабочие будут освобождены от рутинных задач и станут выполнять работу, требующую творческого подхода) [1].

Реализация Industry 4.0 основана на развитии следующих направлений: информационно-коммуникационных технологий (ИКТ), которые обеспечат цифровизацию всех этапов создания и использования продукта как внутри компаний, так и за их пределами; киберфизических систем для контроля и управления физическими процессами и системами (включают

* Варшавский А.Е. Проблемы развития прогрессивных технологий: робототехника // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2017. Т. 8. № 4. С. 682–697. DOI: 10.18184/2079-4665.2017.8.4.682-697

встроенные датчики, интеллектуальные роботы, 3D-печатающие устройства и др.); сетевых коммуникаций (беспроводные и интернет-технологии для связи машин, продуктов, систем и людей); моделирования и виртуализации при разработке продуктов и создании производственных процессов; систем сбора, обработки и использования больших объемов данных и облачных вычислений; средств дополненной реальности и интеллектуальных систем и др.

В результате ожидается повышение производительности за счет значительного сокращения времени между разработкой нового продукта и его поставками потребителю, повышения эффективности, экономии энергии, обеспечения конкурентоспособности на мировом рынке и т.п.

Центральным звеном в программе Industry 4.0 является сотрудничество человека и робота на производствах будущего, где новые поколения роботов с высокой степенью искусственного интеллекта и человек станут равноправными партнерами. Промышленные роботы будут помогать работникам в решении различных задач, при этом улучшится качество производства и производственных процессов. Ожидается, что помимо повышения производительности труда, повысится возможность работы для более пожилых рабочих, так как роботы будут помогать им в выполнении заданий, требующих затрат физического труда. При этом различные продукты могут быть получены на одном и том же производственном оборудовании, что позволит выпускать небольшие партии благодаря возможности быстрой перенастройки оборудования.

МИРОВОЙ РЫНОК РОБОТОТЕХНИКИ

По оценкам компании Boston Consulting Group предполагалось, что мировой рынок роботов, который в 2010 г. составил 15,1 млрд долл., в 2025 г. возрастет до 66,9 млрд долл., см. табл. 1. Этот прогноз, по-видимому, может оправдаться – в 2020 г. объем мирового рынка составил по данным Международной федерации робототехники (IFR) 50 млрд долл. (включая ПО и периферийные устройства).

Таблица 1

Мировой рынок роботов, млрд долл.

Виды роботов	2010	2015	2019	Прогноз
Роботы для персонального использования	1	2,2	8,5	12,1 (2023 г.)
Роботы для коммерческого применения	3,2	4,6	11,2	...
Промышленные роботы	5,8	11,2	13,8	16,8 (2022 г.)
Военные роботы	5,1	...	17,6*	34,6 (2030 г.)
Всего	15,1	...	50**	...

* 2020 г.

** Включая ПО и периферийные устройства, 2020 г.

Источник: авторская разработка по данным [2].

Как следует из приведенных в табл. 1 данных, производство как промышленных, так и сервисных роботов быстро увеличивается и в будущем прогнозируется еще большее ускорение его роста. По данным IFR ожидается, что в 2022 г. рынок промышленных роботов будет в три раза больше, чем в 2010 г., рынок роботов для персонального использования возрастет к 2023 г. в 12 раз, рынок военных роботов к 2030 г. – более, чем в 6 раз.

РЫНОК ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Ежегодные отгрузки промышленных роботов в мире за период 2000–2020 гг. выросли в 3,8 раза (с 98,9 тыс. ед. в 2000 г. до 376 тыс. ед. в 2020 г.). В 2010–2015 гг. среднегодовые темпы роста продаж промышленных роботов составляли 22,1%. Мировой объем продаж промышленных роботов в 2019 г. составлял 34 млрд долл. [3].

При этом рост мировых отгрузок промышленных роботов происходил неравномерно: в 1995–2003 гг. ежегодно отгружалось около 70–80 тыс. роботов (за исключением 2000 г., когда было отгружено почти 100 тыс. ед.), в 2004–2005 гг. произошел значительный рост отгрузок (до 120 тыс. ед. в 2005 г.), но в 2006–2008 гг. количество отгруженных роботов вновь стабилизировалось на уровне около 110 тыс. ед. Следует отметить, что мировой финансовый кризис привел к резкому сокращению отгрузок только в 2009 г. (примерно до 60 тыс. ед.), но уже в 2010 г. был вновь достигнут уровень 2005 г., и в 2011 г. быстрый рост продолжился (отгрузки составили более 165 тыс. ед.), хотя в 2012 г. было отгружено 159,3 тыс. ед. В последующем быстрый рост возобновился: так, предложение промышленных роботов во всем мире в 2015 г. составило 254 тыс. ед., а в 2020 г. – 376 тыс. ед.; в 2015 г. установленных промышленных роботов во всем мире насчитывалось 1632 тыс. ед., а в 2020 г. – 3015 тыс. ед.

В настоящее время страны Азии продолжают наиболее активно внедрять промышленные роботы, при этом на первое место в мире вышел Китай (168,4 тыс. ед. в 2020 г.), далее следуют Япония (38,7 тыс. ед.), Южная Корея (30,5 тыс. ед.), Тайвань (7,3 тыс. ед.). Доля Азиатско-Тихоокеанского региона в общем объеме мировых продаж выросла с 53,1% в 2012 г. до 70,7% в 2020 г. и в парке установленных промышленных роботов с 50,9% в 2012 г. до 63,4% в 2020 г. Доля стран Америки в ежегодных отгрузках снизилась с 17,7 до 10,4%, и немного уменьшилась в парке промышленных роботов с 16,8 до 15%, соответственно. Доля европейских стран также снизилась: в ежегодных отгрузках – с 25,9 до 18,1% и в парке – с 30,8% до 20,3%, соответственно, см. табл. 2.

В США в 2020 г. было продано 30 800 ед. (на 6,7% меньше, чем в 2019 г.), в Германии – 22 300 ед. (рост на 8,8%), в Италии – 8525 ед. (снижение на 23,2%), Испании – 3400 ед., Франции – 5400 ед. (рост на 3%) и Великобритании – 2200 ед. Отмечается также рост продаж роботов в Чехии и Польше.

Масштабы распространения промышленных роботов хорошо иллюстрируются с помощью показателя обеспеченности этим видом оборудования. Плотность роботизации в расчете на 10000 занятых наиболее велика в Южной Корее (855 робота на 10 тыс. занятых в 2019 г., рост на 119,8% по сравнению с 2012 г.), в Японии (364, рост по сравнению с 2012 г. на 9,6%, для автомобильной промышленности снижение составило 20,1%), в Германии (346, рост на 26,7% по сравнению с 2012 г., для автомобильной промышленности рост составил 15,7%). В среднем во всем мире этот показатель равен 113, в странах Европы – 114, Америки – 103 и Азии – 118, однако в России в 2019 г. имелось только 6 промышленных роботов на 10 тыс. занятых, см. табл. 3.

Таблица 2

Структура отгрузок и парка промышленных роботов по странам, %

Страна	Год	Отгрузки			Парк		
		2012	2019	2020	2012	2019	2020
Страны Америки		17,7	12,3	10,4	16,8	...	15,0
Бразилия		1,0	...	0,4	0,6	...	...
США		16,5*	8,6	8,2	16,0	11,0	...
Канада		0,7	...	0,9	...
Мексика		...	1,2	0,9	...	1,4	...
Прочие		0,1	2,5	0,2	0,1	...	...
Страны Азии и Австралия		53,1	65,3	70,7	50,9	...	63,4
Китай		14,4	36,7	44,8	7,8	28,7	31,5
Индия		0,9	1,1	1,1	0,6	1,0	...
Япония		18,0	13,0	10,3	25,1	13,0	12,4
Южная Корея		12,2	7,3	8,1	11,2	11,7	11,4
Тайвань		2,1	...	2,0	2,6	2,6	...
Таиланд		2,5	...	0,8	1,4	1,2	...
Прочие		2,9	7,2	3,7	2,0	...	8,1
Страны Европы		25,9	19,3	18,1	30,8	21,2	20,3
Чехия		0,7	0,7	...	0,6	0,7	...
Франция		1,9	1,4	1,4	2,7	1,5	...
Германия		11,0	5,4	5,9	13,1	8,1	...
Италия		2,8	2,9	2,3	4,9	2,7	...
Испания		1,3	...	0,9	2,3	1,3	...
Великобритания		1,8	...	0,6	1,2	0,8	...
Прочие		6,5	9,0	7,0	5,9	...	...
Страны Африки		0,2	...	...	0,2	...	...
Прочие страны мира		3,1	...	...	1,3	...	...
Всего		100	100	100	100	100	100

* США, Канада и Мексика.

Источник: авторская разработка по данным [4–8].

Таблица 3

Плотность роботизации, ед./10000 занятых, 2012, 2015 и 2019 гг.

Страна	2012			2015			2019		
	Всего	В том числе		Всего	В том числе		Всего	В том числе	
		В автомо- бильной промыш- ленности	В про- чих от- раслях		В автомо- бильной промыш- ленности	В про- чих от- раслях		В автомо- бильной промыш- ленности	В про- чих от- раслях
Южная Корея	389	...	302	531	1218	411	855	2589*	...
Япония	332	1562	219	305	1276	213	364	1248	364
Германия	273	1133	147	301	1147	170	346	1311	346
США	135	1091	76	176	1218	93	228	1287	228
Швеция	169	...	...	212	734	...	277	...	...
Канада	103	...	...	136	795	61	165	...	...
Чехия	61	...	...	93	...	...	147	555*	...
Нидерланды	85	...	...	120	...	...	194	...	...
Франция	130	1137	...	127	940	75	177	...	...
Италия	157	1090	115	160	877	126	212	...	...
Китай	23	213	11	49	392	...	187	938	187
Россия	2	...	...	3	...	...	6	...	...

* 2018 г.

Источник: авторская разработка по данным [9–11].

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Основная доля отгрузок промышленных роботов приходится на автомобильную, электротехническую и электронную отрасли промышленности. При этом в 2013–2019 гг. в электротехнической и электронной промышленности, а также в производстве металлов и машиностроении парк роботов вырос наиболее значительно – более чем в 2 раза (см. табл. 4).

Таблица 4

Парк и структура использования промышленных роботов по отраслям

Отрасль	Парк роботов, тыс. ед.			Структура, %		
	2013	2018	2019	2013	2018	2019
Автомобильная промышленность	566,5	847	923	42,5	34,7	33,9
Электротехническая и электронная промышленность (включая производство компьютеров, компьютерного оборудования, радио и телевизионного оборудования, и средств связи, медицинских, прецизионных и оптических приборов)	278,5	597	672	20,9	28,1	31,6
Производство резиновых изделий и пластмасс	135,9	176	182	10,2	8,3	8,6
Производство пищевых продуктов и напитков	46,1	74	81	3,5	3,5	3,8
Производство металлов и машиностроение	138,7	248	281	10,4	11,7	13,2
Прочие	166,7	149	174	12,5	7,0	8,2
Неопределенные (Unspecified)	...	349	410	...	16,4	19,3
Всего	1332,2	2440	2723	100	100	100

Источник: авторская разработка по данным [7, 8].

Последние десятилетия автоматизация на базе станков с ЧПУ, автоматов и полуавтоматов, роботизированных технологических комплексов, гибких производственных модулей, автоматических линий, в том числе гибких, переналаживаемых и роторно-конвейерных, а также гибких производственных систем и участков является генеральной мировой тенденцией развития машиностроения. Выделяют вспомогательные (используемые в качестве дополнительного технологического оборудования, например, загрузочные роботы, которые обслуживают металлорежущие станки, прессы и т.д.) и технологические промышленные роботы (применяемые в качестве основного технологического оборудования для точечной и контурной – лазерной или плазменной – сварки, гидроабразивной резки, абразивной безразмерной обработки – полирования, зачистки, для сборки изделий и т.д.). Основными областями применения промышленных роботов до 2015 г. являлись сварка (22%), литейное производство (около 15%), механообработка (12%), сборка (6%) [12, 13]. В 2019 г. основными областями применения стали перемещение (42%), сварка и пайка (21%), сборка (10%), обработка (1%) [14].

Промышленные роботы сочетают в себе высокую гибкость и приспособляемость, повторяемость, конфигурируемость, легкость и быстроту программирования, надежность в эксплуатации и возможность полной интеграции с передовыми технологиями. Роботизированные системы широко используются во многих областях: в аэрокосмической, автомобильной, металлургической, фармацевтической, пищевой промышленности и многих других. Современные роботы обладают новыми характеристиками: ловкостью, памятью,

обучаемостью и умением распознавать объекты. В результате в настоящее время они применяются в сборке и упаковке, тестировании или проверке продукции и других областях.

Наиболее широко роботы используются в автомобильной промышленности (ежегодные отгрузки выросли с 69,1 тыс. в 2013 до 126 тыс. роботов в 2018 г., сократились до 80 тыс. в 2020 г.), однако в структуре парка используемых промышленных роботов доля этой отрасли несколько сократилась (с 35,9% в 2017 г. до 33,9% в 2019 г.), см. табл. 4. Внедрение коллаборативных роботов привело к росту доли электронной промышленности в парке роботов (с 24 до 31,6%, соответственно) и отгрузок с 36,1 тыс. ед. в 2013 г. до 109 тыс. ед. в 2020 г.

Таблица 5

Показатели обновления парка многоцелевых промышленных роботов
(отгрузки/численность парка, % и прирост парка/отгрузки, раз)

Страна	Год	Отгрузки/численность парка, %				Прирост парка/отгрузки, раз			
		2013	2014	2018	2019	2020	2014	2019	2020
Страны Америки		13,4	13,1	15,3	12,1	8,6	0,69	...	...
Бразилия		16,3	13,2	...	...	...	0,78	...	...
США, Канада и Мексика		13,3	13,1	...	11,4	9,6	0,68	...	0,5
США		11,0	9,9	...	...	0,3
Канада		14,3	8,8	...	...	1,6
Мексика		12,3	8,0	...	...	1,6
Прочие		14,9	16,2	...	...	...	0,91	...	...
Страны Азии и Австралия		14,3	17,8	20,5	14,8	13,9	0,69	...	...
Китай		27,5	30,2	26,3	17,9	17,7	0,99	1,4	1,0
Индия		19,8	18,1	20,7	16,3	...	0,98	0,8	...
Япония		8,3	9,9	18,9	14,1	10,3	-0,28	1,3	0,5
Южная Корея		13,6	14	12,6	8,7	8,9	0,84	0,7	0,8
Тайвань		14,6	15,9	...	...	...	0,90	...	...
Таиланд		15,8	15,3	...	...	...	0,97	...	...
Прочие		17,9	35,4	...	...	...	0,95	...	...
Страны Европы		11	11,1	14,4	12,8	11,1	0,41	0,7	0,5
Чехия		16,5	16,1	15,5	13,5	...	0,94	0,7	...
Франция		6,7	9,1	...	12,5	...	-0,02	...	...
Германия		10,9	11,4	12,4	9,3	...	0,418	0,3	...
Италия		8	10,4	...	14,9	...	0,12	...	...
Испания		9,8	8,3	...	...	...	-0,05	...	...
Великобритания		15,9	12,4	...	...	...	0,64	...	...
Прочие		14,2	11,7	...	...	...	0,70	...	...
Страны Африки		20,9	11	...	...	...	0,87	...	...
Прочие страны мира		4,7	34,9	...	...	...	1,00	...	...
Всего		13,4	15,5	17,3	14,0	12,5	0,65	0,8	0,8

Источник: авторская разработка по данным [10, 17].

В Японии, например, в середине второго десятилетия 61% промышленных роботов использовался в производстве автомобилей и запасных частей к ним, 8% – в производстве металлоизделий, 7% – в резиновой промышленности, производстве изделий из пластмасс, а также в электротехнической промышленности, 2% – в пищевой промышленности и 15% – в прочих отраслях [15].

Анализ показателей обновления парка промышленных роботов свидетельствует, что в 2014 г. наиболее быстро происходило обновление (прирост) парка промышленных роботов в Китае, Индии, Таиланде, Чехии, Тайване, Южной Корее, Бразилии. При этом во Франции, Испании и Японии в 2014 г. отмечался отрицательный прирост парка промышленных роботов, см. табл. 5.

В настоящее время промышленные роботы в среднем выполняют около 10% всех производственных задач. В соответствии с прогнозом Forbes, через 10 лет эта доля вырастет до 25%, а ежегодные отгрузки промышленных роботов увеличатся с 11 млрд в 2015 г. до 24 млрд долл. в 2025 г. [16], см. табл. 1. К 2025 г. прирост производительности за счет более широкого использования промышленных роботов, как ожидается, составит от 10% до 30% (в зависимости от страны и отрасли). Совершенствование технологий будет сочетаться со снижением затрат (например, цена роботизированной точечной сварки снизилась в среднем со 182 тыс. долл. в 2005 г. до 133 тыс. долл. в 2014 г. и в ближайшие 10 лет может снизиться еще на 20%).

НОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

В последние годы происходит значительный рост использования следующих типов промышленных роботов:

- шарнирные (сочлененные) роботы; одним из основных факторов роста рынка является необходимость обеспечения точности работы на линиях сборки);
- декартовые или линейные роботы (также называются порталными, используются для различных промышленных применений; ожидается, что рынок этих роботов будет расти, благодаря расширению их использования в обработке материалов и сборке);
- параллельные (delta) роботы (ожидается, что мировой рынок параллельных роботов будет стабильно расти; в настоящее время такие роботы используются в пищевой промышленности для сортировки и упаковки продуктов питания; предполагается создание интеллектуальных и автономных роботов этого типа, особенно с распространением Интернета вещей (IoT), что приведет к увеличению скорости операций, снижению производственных затрат, повышению качества продукции, улучшению технического обслуживания);
- SCARA роботы (селективная совместимая монтажная роботизированная рука; используются для высокоскоростных точных операций, таких как уплотнение, распределение, сборка и пр.; эти роботы позволяют снизить время цикла и повысить пропускную способность; по прогнозу мировой рынок таких роботов будет расти, в первую очередь, благодаря росту спроса со стороны автомобильной промышленности).

При прогнозировании развития робототехники необходимо учитывать рынок компонентов роботов, в первую очередь контроллеров (ожидается, что рынок контроллеров для роботов будет расти; разработка контроллеров компактного и малого размера, встраиваемых в роботы, привела к расширению применения промышленных роботов в полупроводниковой и электронной промышленности, а также в сфере НИОКР). Также необходимо учитывать рынок программного обеспечения для роботов – в соответствии с прогнозами ожидается, что основная доля мирового рынка будет приходиться на разработчиков OEM (Original Equipment manufacturer, – оригинальный производитель оборудования, –

программное и аппаратное OEM-обеспечение поставляется специально для распространения среди компаний, которые занимаются сборкой систем).

Новые тенденции развития промышленных роботов характеризуются следующим: повышение простоты использования, развертывания и обслуживания; создание коллаборативных роботов; новые способы управления роботами; усовершенствование органов «чувств» роботов; повышение показателей эффективности производства при использовании роботов и обучение новых сотрудников с помощью роботов. Рассмотрим их более подробно.

Повышение простоты использования, развертывания и обслуживания. В настоящее время особое внимание уделяется нахождению более простых способов управления и использования роботов. В ближайшем будущем ожидается появление роботов, которые смогут самопрограммироваться (в настоящее время, в основном, каждый робот обучается и программируется уникальным способом); прогнозируется повышение роли сенсорных устройств (техническое зрение, силовые сенсорные устройства и др.); использование речевых команд в управлении роботами.

Создание коллаборативных роботов. Ожидается, что тесное сотрудничество между людьми и роботами на сборочных линиях и других производствах определит будущее промышленной робототехники. Коллаборативные роботы (коботы) предназначены для совместной работы с людьми, они обучаются с помощью демонстрации человеком необходимых действий. За период 2012–2015 гг. количество проданных коллаборативных роботов возросло почти в 5 раз, а в стоимостном выражении их рынок вырос в 6 раз. По оценкам компании Barclays Research, мировой рынок коллаборативных роботов вырастет с 16 млн в 2012 г. и 111 млн долл. в 2015 г. до 12,2 млрд долл. в 2025 г., а общий парк роботов этого типа вырастет с 700 ед. в 2012 г. до 700 тыс. ед. в 2025 г. Считается, что использование коллаборативных роботов позволит США и другим странам с высокой оплатой труда вернуть производство, которое было перемещено в Китай, Мексику и другие страны.

Новые способы взаимодействия с роботами. Прогнозируется, что роботы будут управляться командами с любого устройства, в любом месте с подключением к Интернету с целью упрощения взаимодействия человека и робота на всех этапах (проектирование, продажа, монтаж, наладка, эксплуатация, контроль и обслуживание).

Усовершенствованные «органы чувств» роботов. Для того, чтобы возможности роботов приблизить к человеческим, необходимо обеспечить им способность находить, идентифицировать и манипулировать объектами. Многие разработки в настоящее время нацелены на совершенствование конечностей манипуляторов, имитирующих человеческую руку, для придания им большей гибкости, скорости и ловкости.

Повышение эффективности. Современные промышленные роботы обеспечивают быстрый возврат инвестиций. Интеграция роботов в производство может повысить производительность труда, снизить накладные расходы, обеспечить гибкость, уменьшить количество отходов, а также повысить качество.

Роботизированное обучение. Проектирование, создание, маркетинг, продажа, установка, эксплуатация и техническое обслуживание роботов создает рабочие места, которые ранее не существовали; эти места, как правило, высокооплачиваемы, с хорошим уровнем

оплаты труда. Роботы позволяют компаниям оставаться конкурентоспособными, даже при сохранении производства в странах с высокой себестоимостью, осуществлять reshoring.

РЫНОК СЕРВИСНЫХ РОБОТОВ

Общее количество профессиональных сервисных роботов (для ОПК и процессов логистики, полевые, медицинские роботы, мобильные платформы и др.), проданных в мире в 2015 г., увеличилось на 25% по сравнению с 2014 г., составило 41,0 тыс. ед. (32,9 тыс. ед. в 2014 г.), объем продаж вырос на 14% (4600 млн долл.). В 2018 г. продажи выросли до 271,1 тыс. ед. (рост на 61% по сравнению с 2017 г.), объем продаж вырос на 32% за тот же период (до 9,2 млрд долл.) [18].

По прогнозу IFR, значительно возрастет число и объем продаж следующих роботов: логистических систем; для ОПК; полевых роботов; медицинских роботов (медицинские роботы являются наиболее дорогими, их стоимость в среднем составляет 1 млн долл., с учетом стоимости аксессуаров и дополнительных услуг).

К 2017 г. в общей сложности использовалось около 395 000 профессиональных сервисных роботов, однако получить точные оценки затруднительно из-за различного срока эксплуатации роботов (например, подводные роботы могут использоваться более 10 лет, промышленные роботы – 12 лет, срок службы роботов для ОПК – несколько месяцев и менее) [19].

В 2015 г. роботов для ОПК было продано около 23% от общего объема продаж профессиональных сервисных роботов; доля проданных в 2015 г. полевых роботов составила 16%, медицинских роботов – 3% (32% от общей стоимости проданных профессиональных сервисных роботов); роботов для процессов логистики – 46% от общего объема продаж и 17% от общей стоимости профессиональных сервисных роботов.

Ожидается дальнейший рост потребительских сервисных роботов, в том числе для домашнего пользования и роботов для развлечения и досуга. Например, только в 2015 г. было продано около 5,4 млн сервисных роботов для домашнего использования (на 16% больше, чем в 2014 г., объем продаж за год увеличился с 2,1 до 2,2 млрд долл.). В основном это роботы для чистки помещений, скашивания травы, роботы для развлечения и для образования. Отдельно выделяются роботы для инвалидов. Их продажи также значительно выросли (только за два года они увеличились более чем в 6 раз – с 699 ед. в 2013 г. до 4713 ед. в 2015 г.).

В 2018 г. общее количество сервисных роботов для личного и домашнего использования составило около 16,3 млн ед. (рост на 59% по сравнению с 2017 г.), а их общая стоимость выросла на 15% (до 3,66 млрд долл.). В период 2019–2022 гг. прогнозировался среднегодовой рост продаж этих роботов на 40% (до 61,1 млн ед. в 2022 г.).

РАСШИРЕНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ПРОГРАММЫ РАЗВИТИЯ РОБОТОТЕХНИКИ В НАИБОЛЕЕ РАЗВИТЫХ СТРАНАХ

Германия. В 2015 г. сектор робототехники и автоматизации в Германии достиг 12,2 млрд евро, рост составил 7% по сравнению с предыдущим годом. Высокий спрос во

всем мире на робототехнику и интегрированные решения для сборки позволяют прогнозировать дальнейший рост продаж. В 2016 г. Союз немецких машиностроителей (VDMA) оценил объем продаж на уровне 12,5 млрд евро (рост на 2%), в 2019 г. – 14,7 млрд евро [20].

По оценкам, приведенным в [21], 81% промышленных менеджеров в Германии ожидают, что использование роботов в малых и средних компаниях существенно возрастет благодаря появлению коллаборативных роботов (коботов). В настоящее время 52% немецких компаний либо уже автоматизированы с помощью промышленных роботов, либо рассматривают конкретные возможности использования робототехники. Быстрому распространению промышленных роботов на малых и средних предприятиях способствует низкая стоимость нового поколения роботов и гибкость их работы. Конкуренция в области промышленных роботов в Германии довольно высока, помимо собственной компании Кука, имеются также дочерние компании ABB Robotics, Stäubli и другие. По данным IFR, Германия занимала в 2020 г. пятое место в мире по числу установленных промышленных роботов и первое – в Европе.

Северная Америка. По данным Robotic Industries Association, в 2015 г. в Северной Америке были сделаны заказы на 31 464 робота на сумму 1,8 млрд долл. (на 14% больше в количественном и на 11% в стоимостном выражении по сравнению с 2014 г.). Было отгружено 28049 роботов общей стоимостью в 1,6 млрд долл. (на 10% и 9% больше, чем в 2014 г. соответственно). После сокращения спроса на роботов в связи с пандемией COVID-19, в III квартале 2021 г. были сделаны заказы на почти 29 тыс. роботов на сумму 1,48 млрд долл. [22]. В 2015 г. автомобильная промышленность была основным потребителем роботов, на втором месте была полупроводниковая и электронная промышленность. Наиболее значительно вырос спрос на промышленных роботов для нанесения покрытий и распределения, складской техники и точечной сварки.

За первые девять месяцев 2021 г. заказы на роботов в автомобилестроении выросли на 20% по сравнению с тем же периодом 2020 г. и составили 12 544 ед. В то же время заказы в другие отрасли увеличились на 53% (16 355 ед.). Рост продаж в отраслях, не связанных с машиностроением, по сравнению с тем же периодом 2020 г. составил: в металлургии – 183%, в производстве продуктов питания и товаров народного потребления – 40%, в производстве полупроводников и электроники/фотоники – 26%, производстве пластмассы и резины – 10%, в остальных отраслях – 97%.

По данным обследования, проведенного компанией PwC, 59% производителей в середине прошлого десятилетия использовали роботизированную технологию; 28% считали, что замена рабочих роботами будет иметь наибольшее влияние на производство США в ближайшие 3–5 лет; но 35% предполагали, что наибольшее влияние будет оказывать создание новых рабочих мест для проектирования передовых роботов и роботизированных операционных систем¹.

Китай. С 1999 г. спрос на роботов в стране растет в среднем на 35% в год. За 2009–2011 гг. поставки роботов выросли почти в 5 раз. Основной спрос на роботов предъявляет

ⁱ The new hire: How a new generation of robots is transforming manufacturing. URL: <https://www.nist.gov/system/files/documents/mep/data/TheNewHire.pdf> (дата обращения: 06.09.2022).

автомобилестроение. Если в 2006 г., по данным IFR, в отрасли было всего 36 роботов на 10 тыс. работников, то в 2011 г. – уже 141 и в 2015 г. – 392, см. выше.

В 2015 г. объем продаж роботов в Китае превысил 68 тыс. ед. (на 18% выше, чем в 2014 г.). В основном Китай закупает роботов у 4-х транснациональных корпораций – ABB Group, Fanuc Corp., Yaskawa Electric Corp и Kuka Robotics. На них приходится 58% рынка. Однако в 2013 г. каждый четвертый из установленных за год в Китае 37 тыс. промышленных роботов был произведен в стране. В 2020 г. в Китае было отгружено около 167 тыс. роботов, из которых 123 тыс. ед. – от иностранных поставщиков. Китайскими компаниями было поставлено на внутренний рынок 44 тыс. роботов (на 8% больше, чем в 2019 г.) [23].

В соответствии с прогнозом IHS Technology в структуре продаж промышленных роботов будут преобладать шарнирные (сочлененные) роботы, хотя ожидается увеличение доли SCARA роботов в связи с тем, что отрасли, в которых они используются, сталкиваются с нехваткой рабочей силы и ростом ее стоимости.

Быстрый рост рынка промышленных роботов в Китае вызван целым рядом причин: старение населения (доля населения в возрасте до 65 лет сократилась с 95% в 1990 г. до 92% в 2010 г. и продолжает сокращаться); подорожание рабочей силы. Развитие робототехники получило правительственную поддержку в рамках программы «Сделано в Китае 2025» («Made in China 2025»), согласно которой к 2030 г. страна должна стать лидером на рынке робототехники. План развития робототехники включает в себя следующие цели, которые должны были быть достигнуты к 2020 г.: создание не менее 3 роботостроительных компаний; производство 100 тыс. промышленных роботов китайскими компаниями [24]. Автомобильная промышленность в настоящее время является крупнейшим заказчиком роботов в Китае, на нее приходится около 40% парка роботов, далее следует электронная промышленность.

Эксперты, однако, предупреждают Китай от возможных последствий ускоренной роботизации страны, которая приведет к потере рабочих мест многочисленными работниками среднего звена, особенно в отраслях обрабатывающей промышленности.

Южная Корея. Южная Корея является одной из ведущих робототехнических стран. Правительство страны поддерживает робототехнические технологии на протяжении более 10 лет, а в апреле 2015 г. разработало стратегию инноваций в промышленности (Инновационная стратегия обрабатывающей промышленности 3.0) и опубликовало проект роботизации малого и среднего бизнеса в стране. В настоящее время почти все робототехнические компании Южной Кореи представляют собой малые и средние предприятия. В 2018 г. парк промышленных роботов в Южной Корее вырос до 300 тыс. ед., к 2020 г. он достиг почти 343 тыс. ед. [25].

Правительство Южной Кореи предоставило компании Samsung многомиллионные инвестиции для разработки высокоточных роботов, которые в настоящее время дороги и часто закупаются за рубежом. Предполагалось, что это позволит отказаться от использования китайских рабочих с низкой зарплатой и заменить их роботами. Роботы будут делать мобильные телефоны и другую бытовую электронику, требующую высокого уровня точности. В стране действует Robot Pilot Program, направленная на поддержку и продвижение проектов в области робототехники с дальнейшей их коммерциализацией.

Программа развития робототехники в странах ЕС. С 2014 г. стала разрабатываться новая европейская программа развития робототехники Strategic Research Agenda For Robotics in Europe (SPARC). Программа SPARC охватывает промышленность, сельское хозяйство, здравоохранение, транспорт, гражданскую безопасность, домашние хозяйства. Цель программы состояла в усилении позиции Евросоюза на мировом рынке робототехники и повышении показателя годовых продаж европейских роботов до 60 млрд евро в год к 2020 г.

Программа ставила своей задачей расширение сферы применения робототехники, повсеместного ее использования не только на крупных предприятиях, но и на средних и малых производствах. Ожидалось, что будут созданы 240 тыс. новых рабочих мест в Европе [26].

В дорожной карте были выделены следующие виды роботов [27]: промышленные, медицинские, сельскохозяйственные, гражданские, коммерческие, транспортные и логистические, потребительские.

Промышленные роботы. Предполагается, что в среднесрочной перспективе они помогут решить следующие задачи: создание простых и гибких производств; миниатюрный монтаж; внедрение киберфизических производственных систем; внедрение интуитивных и адаптивных производственных систем, включая интуитивное программирование; развертывание двуруких легких и недорогих манипуляторов; расширение сотрудничества с человеком. Области использования: электронная промышленность, производство транспортных средств и оборудования, металлургическое производство, производство резиновых и пластмассовых изделий, пищевых продуктов, включая напитки, и табака. Особое место занимает применение роботов в пищевой промышленности. Они используются там, где есть высокий уровень ручного труда, потребность в гибком производстве или где имеется значительный риск загрязнения. Предполагается, что будущие возможности робототехники в этой отрасли будут зависеть от степени развития ее модульности и возможностей адаптации (адаптация к индивидуальным заказам, переход на новый тип продукции). Особое внимание уделяется развитию возможностей манипуляции роботов с мягкими материалами, в том числе в таких отраслях, как пищевая и швейная промышленность.

Роботы в области медицины и здравоохранения. Роботы в области медицины и здравоохранения могут быть разделены на три основные группы: клинические, реабилитационные и вспомогательные. Клинические роботы применяются в диагностике, лечении, хирургии и изготовлении лекарств. Реабилитационные роботы – в послеоперационном периоде или при уходе после травм. Вспомогательная робототехника охватывает другие аспекты здравоохранения (основной функцией является предоставление вспомогательной помощи пациентам в больнице).

Роботы в сельском хозяйстве. Главной целью применения робототехники в сельском хозяйстве является повышение эффективности фермерских хозяйств при сохранении экономических и экологических стандартов. Ожидается, что возрастающее использование роботизированных технологий повлияет на качество жизни работников фермы и сможет привлечь молодое поколение в сельское хозяйство. В настоящее время современные робототехнические системы обеспечивают ограниченную автоматизацию процессов. Предполагается, что в будущем произойдет постепенное увеличение уровня автономии за счет обработки большого объема данных и использования знаний о каждом хозяйстве (например,

предпочтений фермера и работников), улучшения анализа почвы, распределения сельскохозяйственных культур более эффективным способом. Сельскохозяйственные автономные роботы можно распределить по трем основным категориям: земледелие, животноводство и производство специальных культур. В будущем ожидается, скорее всего, создание систем, способных избирательно собирать урожай спелых плодов, а также диагностировать и избирательно реагировать на ранние признаки заражения вредителями или заболевания сельскохозяйственных культур.

Гражданская робототехника. Сфера гражданской робототехники включает в себя широкий спектр работ: от поддержки гражданской инфраструктуры (дорог, канализации, обслуживания общественных зданий, инспекция рек, сбор мусора и т.д.) до поддержки правоохранительных органов и помощи в чрезвычайных ситуациях. Гражданские роботы будут работать под наблюдением квалифицированного персонала в опасных, загрязненных средах или в экстремальных условиях, которые представляют угрозу жизни людей. Типичными областями применения роботов для гражданской инфраструктуры являются: обслуживание и чистка городских улиц; услуги гражданской безопасности (полиция или пограничные службы, органы безопасности); аварийные службы (пожарная служба, скорая помощь и береговая охрана); экологические услуги, такие как наблюдение рек, контроль качества воздуха и степени загрязнения окружающей среды. Робототехника используется также в научных исследованиях, таких как исследования океанов, вулканов, геологических обследованиях. Ожидается рост рынка дистанционно управляемых морских роботов, автономных беспилотных автомобилей и др.

Роботы для коммерческой сферы. Роботы для коммерческой сферы будут использоваться в нефтегазовой и горнодобывающей промышленности, в строительстве, энергетике, маркетинге, для непрерывного контроля, инспекции и ремонта, для осмотра и технического обслуживания коммерческой инфраструктуры и пр.

В будущем предполагается разработать следующие виды роботизированных систем в сфере транспорта и логистики: автономные наземные средства, автономное комплектование, автономная упаковка и загрузка, планирование оптимизации складских операций, системы разгрузки, укладки на поддоны, распаковки, переупаковки и штабелирования, логистические процессы в розничной торговле и др.

Потребительские роботы. Потребительские роботы включают в себя: бытовую технику, средства для развлечений, образовательных роботов, помощников в быту.

Стратегия развития робототехники в Японии. Вслед за европейской, в 2014 г. была принята программа развития робототехники в Японии, получившая название «Революция роботов». Японская программа ориентирована на повсеместное распространение робототехники в медицине, сельском хозяйстве и строительстве и была рассчитана на 2015–2020 гг. Программа ставила своей целью обеспечить рост продаж робототехники с 600 млрд иен (4,9 млрд долл.) в год до 2,4 трлн иен в 2020 г. Необходимость программы объяснялась целым рядом причин: старение общества, нехватка рабочей силы, повышенное внимание к робототехнике в других странах как к ключевому условию роста экономики.

Промышленные роботы. Японские компании являются крупнейшими поставщиками промышленных роботов в мире. Продажи роботов в 2012 г. составили 340 млрд иен (около 50% рынка), при этом в ключевых элементах робототехники, таких как точные

редукторы и ряд других, доля Японии доходила до 90%. В 2021 г. продажи ПР достигли 840,3 млрд иен. Правительство Японии рассматривает роботизацию в качестве потенциального решения проблем быстро стареющего общества (число граждан в возрасте от 65 лет и выше в конце 2021 г. превысило 36 млн человек, почти треть населения страны). По оценкам правительства, численность занятых в стране будет продолжать снижаться дальше. Безработица в настоящее время (2021 г.) находится на минимальном уровне в 3,1%, некоторые производства вынуждены механизировать производство из-за невозможности найти сотрудников.

Сервисные роботы. По оценкам, объем рынка сервисных роботов, который в 2012 г. составлял около 60 млрд иен, включая медицинские услуги, приложения в области безопасности и логистики, вырастет до 2,6 трлн иен в 2025 г.

По данным Boston Consulting Group, робототехника Японии может помочь сократить на 25% затраты труда заводских рабочих к 2025 г. и привести к значительному повышению производительности труда в секторе услуг (по оценкам, на 60%).

По Стратегическому плану развития роботов в Японии, важнейшими являются следующие направления: превращение нероботизированных устройств в роботов с помощью новейших сенсорных технологий и технологий искусственного интеллекта (например, автомобили, бытовая техника, мобильные телефоны и т.д.); использование роботов на производстве, а также в различных сферах повседневной жизни, что приведет к формированию общества, в котором добавленную стоимость будут создавать роботы. Если до настоящего времени роботизация осуществлялась, в основном, крупными компаниями в автомобильной, электротехнической и электронной отраслях промышленности, то в будущем роботы будут обслуживать потребности пищевой и легкой промышленности (продовольствие, косметические, медицинские и фармацевтические товары) и сферы услуг.

В целом было намечено увеличить рынок роботов, используемых в производственном секторе к 2020 г., повысить темпы роста производительности труда в обрабатывающей промышленности более чем на 2% в год, увеличить уровень роботизации процессов сборки для крупных компаний и для малого и среднего бизнеса.

Для сервисных роботов предполагается многократное увеличение рынка роботов, используемых в непромышленной сфере и трехкратный рост производительности труда в сфере услуг. Ожидался рост внутреннего рынка хирургических роботов, увеличение доли больных, за которыми ухаживают роботы, доли роботов для реабилитации.

В сфере обслуживания инфраструктуры, ликвидации последствий стихийных бедствий и строительстве ожидается увеличение темпов распространения автоматизированных технологий с использованием датчиков, роботов и технологий неразрушающего тестирования.

В сельском, лесном хозяйстве, рыболовстве и пищевой промышленности происходит ввод в эксплуатацию в полевых условиях самоходных тракторов, внедрение моделей новых роботов, которые будут способствовать энергосбережению и повышению производительности труда в этих отраслях.

РОБОТЫ В РОССИИ

Интенсивное развитие робототехники, происходящее в мире, неизбежно ставит вопрос об ускорении развития этой революционной технологии в нашей стране.

Однако за период перехода к рыночной экономике отечественное станкостроение было в значительной степени разрушено. По данным Н. Паничева, последнего министра станкоинструментальной промышленности СССР, к 2011 г. сохранилось всего около 180 предприятий и организаций этой отрасли (примерно 70% от производственной мощности в РСФСР), которые выпускали только 5% продукции от уровня советского времени (половина этого выпуска шла на экспорт). При этом полностью уничтожено 42 станкостроительных предприятия. Особенно пострадали предприятия в Москве – Московский станкостроительный завод им. Орджоникидзе, «Фрезер», Завод координатно-расточных станков, Институт ЭНИМС и завод «Станкоконструкция», «Красный пролетарий» [28]. Все это значительно усложняет ситуацию и требует незамедлительного принятия соответствующих мер на самом высоком государственном уровне.

Развитие парка производственных роботов требует больших усилий по восстановлению и дальнейшему развитию производств, являющихся основными потребителями этой прогрессивной технологии и предъявляющих спрос на робототехнику. Очевидно, с помощью стартапов и других частных мероприятий развитие робототехники не может быть осуществлено в желаемые сроки [11, 29].

Во времена СССР было выпущено в общей сложности более 100 тыс. промышленных роботов. Они заменили более одного миллиона рабочих. Однако за период 1992–1994 гг. почти все эти роботы перестали существовать. На 2004 г. парк роботов в России оценивался в 5 тыс. ед., в 2015 г. – 3 тыс. ед., в 2019 г. – 6,2 тыс. ед. [30, 31]. В то время, как страны Азии, Америки и Европы продолжают наиболее активно внедрять промышленные роботы, см. выше, показатели для России представляются особенно низкими. По данным IFR и НАУРР (Национальная ассоциация участников рынка робототехники), продажи промышленных роботов в России в 2009 г. составили 268 ед., в 2010 г., несмотря на общее оживление в экономике, продажи сократились до 232 ед.; в 2013 г. объем продаж составил 615 роботов, но в 2014 г. объем продаж снизился примерно до 340 роботов из-за падения валютного курса. В 2019 г. продажи роботов составляли 1410 ед., плотность роботизации – 6 ед. (для сравнения: в Бразилии плотность роботизации составляла в 2018 г. 14 ед., в Индии – 3 ед.). В 2021 г. в России больше всего было установлено роботов компании Kuka (68% общих продаж) [32].

Следует учитывать также компании-системные интеграторы, встраивающие роботы в технологический процесс (разработка специализированной оснастки, настройка ПО, сервис и т.д.), которых в России насчитывается около 50 компаний-интеграторов), см. [33]. В указанной работе отмечаются проблемы развития производства и использования роботов в стране, в том числе наличие готовых импортных решений; недостаток собственных технологий производства; отсутствие российской электронной базы (все современные комплектующие и технологии зарубежные); слабая инфраструктура; нехватка оборудования и ПО для проектирования; недостаток государственной поддержки робототехники в целом; отсутствие реальной поддержки малых инновационных компаний со стороны государства; инертность и низкий старт реализации целевой программы развития госпредприятий с применением робототехники; ориентация на задачи служб специального назначения; отсутствие понятных и прозрачных механизмов финансирования исследований; проблемы с поставкой и закупкой комплектующих, что существенно тормозит разработки.

По оценке экспертов, инвестиции РФ в робототехнику составляли 30–50 млн долл. в год, тогда как общемировые расходы составляли в 2020 г. 128,7 млрд долл. [34, 35]. Ведущими российскими производителями промышленных роботов являются Arripix Robotics, VID Technologies, Bitrobotics, Hamster Robotics, АвангардПЛАСТ, Андроидная техника, АО «НПО НИИИП-НЗИК», «АРКОДИМ-Про», «Норма ИС», «Роботех Системы», «Русские роботы», «Эйдос-Робототехника».

Роботы используются прежде всего в автомобилестроении, медицине, производстве военной техники. Для развития производства предполагается использовать ряд мер (субсидирование процентной ставки по кредитам, налоговые льготы и др.) по поддержке компаний, осуществляющих исследования в сфере робототехники и предпринимающих шаги по коммерциализации результатов своих исследований.

Существует несколько факторов, сдерживающих применение промышленных роботов в России. Одна из причин, по которым развитие промышленных роботов в России существенно отстает от показателей ведущих зарубежных стран, состоит в отсутствии государственной поддержки и налоговых льгот для предприятий, выпускающих промышленные роботы. Кроме того, необходимо наличие квалифицированных кадров, способных обеспечить эксплуатацию роботов.

Еще одним существенным фактором, определяющим уровень развития робототехники в стране, является уровень развития автомобильной и в целом обрабатывающей промышленности. Необходима значительная локализация производства – уровень локализации производства иномарок невелик; руководители российского «АвтоВАЗа» оценивали спрос на роботов со стороны автомобильной промышленности России в 300–400 роботов в год, причем около 200 из них производилось для собственных нужд «АвтоВАЗа» Волжским машиностроительным заводом, закрытом в 2015 г.

В России особое внимание следует, очевидно, уделять и развитию сервисных роботов, учитывая крайне неблагоприятную демографическую обстановку в стране. Безусловно, безальтернативным является ускоренное развитие военных роботов из-за большой протяженности границ и необходимости обеспечения обороноспособности страны. Российский рынок робототехники представлен в основном космическими и специальными роботами (саперами, разведчиками), что затрудняет точную оценку объемов производства робототехники. Однако отставание от развитых стран значительно [36]. Следует отметить, что ситуация с сервисными роботами, в первую очередь, для медицины, образования, сферы услуг у нас лучше, чем с промышленными роботами.

Следует учитывать и то, что для рынка робототехники характерны длительные, трудоемкие и капиталоемкие этапы проведения НИОКР и создания опытных образцов. Очевидно, ориентация на стартапы, на деятельность отдельных групп энтузиастов-разработчиков роботов в Сколково не может дать сколько-нибудь ощутимых для экономики России результатов. Необходима разработка и реализация полноценной государственной стратегии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, развитию робототехники в наиболее развитых, а также в развивающихся странах уделяется большое внимание. Отставание в этом направлении, особенно

при интенсивном развитии робототехники в мире, для нашей страны недопустимо. Это подчеркивается не только потребностями инновационного развития, но и сложной демографической ситуацией, а также огромной территорией России.

В соответствии с Дорожной картой развития «сквозной» цифровой технологии «Компоненты робототехники и сенсорики», разработанной в 2019 г., на период до 2024 г. включительно потребуется 28,8 млрд руб. бюджетных средств и 73,8 млрд руб. из внебюджетных источников [37]. Следует отметить, что в сравнении с объемами финансирования ряда неприоритетных проектов размер этих средств представляется недостаточно большим (происходит нерациональное использование ресурсов – например, на необоснованную, по мнению многих москвичей, реконструкцию стадиона «Олимпийский» в Москве Сбербанк выдал олигархам от недвижимости Илиеву и Нисанову кредит на 10 лет в размере 39 млрд руб.).

Необходимо срочное ускорение развития промышленных роботов, сервисных роботов, особенно для сельского хозяйства и для ухода за престарелыми и больными, военных роботов.

Представляется целесообразным создание централизованного фонда поддержки фундаментальных и прикладных исследований. Необходимо обеспечение органами государственного управления эффективной координации и достойного финансирования НИОКР, имеющих первостепенное значение для экономики страны в целом и для развития робототехники в частности, а также воссоздание мощного станкостроения в стране.

Для обеспечения научно-технологической безопасности необходимо устранение негативного воздействия рассмотренных макро- и микроэкономических факторов. Требуется осуществление новой структурной политики, основанной на долгосрочных приоритетах развития; ускоренное восстановление ведущих производств обрабатывающей промышленности (станкостроение, радиоэлектронная промышленность и др.); обновление основного капитала, импорт новых для страны технологий, финансовая поддержка и кредитные линии для приоритетных направлений развития; устранение деформаций в оплате труда и чрезмерного неравенства.

Должны быть четко определены направления макроэкономической политики и на этой основе должны быть сформулированы и реализовываться приоритеты научно-технологической и инновационной политики. Система государственных приоритетов должна быть многоуровневой, охватывать отрасли и производства на всех уровнях иерархии. Бизнес вместе с государственными компаниями должны соблюдать эти приоритеты, что требует квалифицированного контроля со стороны органов государственного управления.

Необходимо также изменить цели микроэкономической политики, в первую очередь, обеспечив снижение чрезмерной дифференциации доходов как регионов, так и отдельных домашних хозяйств. Следует понимать, что территориальное неравенство достигло таких размеров, когда возникли чрезвычайно мощные центростремительные тенденции, которые при их сохранении и усилении могут в условиях усиления глобальной нестабильности стать реальной угрозой возможного перехода от сегодняшней России с ее огромной территорией к Московскому княжеству. Соответственно тормозится и инновационная деятельность.

Очевидно, для обеспечения научно-технологической безопасности России должен быть повышен уровень государственного управления, что подтверждается результатами

опроса участников Гайдаровского форума в январе 2017 г., которые показали, что самыми важными являются, по мнению опрошенных, следующие вызовы: неэффективность государственного управления (30% респондентов) и технологическое отставание (26%) [38].

Все это должно учитываться при прогнозировании и разработке различных сценариев долгосрочных тенденций развития прогрессивных технологий, в частности робототехники в России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Industry 4.0: The New industrial Revolution for Europe/ The European Files. January 2017, №45. URL: https://www.iberglobal.com/files/Roland_Berger_Industry.pdf (дата обращения: 16.01.2022).
2. Boston Consulting Group. URL: https://www.bcgperspectives.com/content/articles/business_unit_strategy_innovation_rise_of_robotics/?utm_content=buffercd473&utm_medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer (дата обращения: 16.01.2022).
3. Робототехника (мировой рынок). URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Робототехника_\(мировой_рынок\)#.2A.D0.9E.D0.B1.D1.8A.D0.B5.D0.BC_.D0.BC.D0.B8.D1.80.D0.BE.D0.B2.D0.BE.D0.B3.D0.BE_.D1.80.D1.8B.D0.BD.D0.BA.D0.B0_.D1.80.D0.BE.D0.B1.D0.BE.D1.82.D0.BE.D0.B2_.D0.B4.D0.BE.D1.81.D1.82.D0.B8.D0.B3_.2434_.D0.BC.D0.BB.D1.80.D0.B4](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Робототехника_(мировой_рынок)#.2A.D0.9E.D0.B1.D1.8A.D0.B5.D0.BC_.D0.BC.D0.B8.D1.80.D0.BE.D0.B2.D0.BE.D0.B3.D0.BE_.D1.80.D1.8B.D0.BD.D0.BA.D0.B0_.D1.80.D0.BE.D0.B1.D0.BE.D1.82.D0.BE.D0.B2_.D0.B4.D0.BE.D1.81.D1.82.D0.B8.D0.B3_.2434_.D0.BC.D0.BB.D1.80.D0.B4) (дата обращения: 17.01.2022).
4. IFR Press Conference 2019. URL: <https://ifr.org/downloads/press2018/IFR%20World%20Robotics%20Presentation%20-%2018%20Sept%202019.pdf> (дата обращения: 17.01.2022).
5. Global population of industrial robots at record high, says IFR report. URL: <https://industryeurope.com/sectors/technology-innovation/global-population-of-industrial-robots-at-record-high-says-ifr/> (дата обращения: 17.01.2022).
6. Китай уверенно обходит США по темпам роботизации. URL: <http://robotrends.ru/pub/2039/kitay-uverenno-obhodit-ssha-po-tempam-robotizacii> (дата обращения: 17.01.2022).
7. World Robotic Report 2017. URL: [https://ifr.org/news/ifr-forecast-1.7-million-new-robots-to-transform-the-worlds-factories-by-20/#:~:text=Since%202016%2C%20the%20largest%20number,in%20Europe%20\(611%2C700%20units\)](https://ifr.org/news/ifr-forecast-1.7-million-new-robots-to-transform-the-worlds-factories-by-20/#:~:text=Since%202016%2C%20the%20largest%20number,in%20Europe%20(611%2C700%20units)) (дата обращения: 17.01.2022).
8. World Robotics 2021 report: record of 3 million industrial robots. URL: <https://www.industrialmeeting.club/world-robotics-2021-report-record-of-3-million-industrial-robots/> (дата обращения: 17.01.2022).
9. Kyung L. Study: Korea leading the way in robot density in manufacturing. URL: http://english.hani.co.kr/arti/english_edition/e_business/807678.html (дата обращения: 17.01.2022).
10. McCarthy N. These are the countries with the highest density of robot workers. URL: <https://www.weforum.org/agenda/2020/09/countries-comparison-robot-workers-robotics-change-tech-manufacturing/> (дата обращения: 17.01.2022).
11. US Robot Density in Car Industry Ranks 7th Worldwide. URL: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/us-robot-density-in-car-industry-ranks-7th-worldwide> (дата обращения: 17.01.2022).
12. Черпаков Б. И. Станкостроение, робототехника, автоматизированные комплексы и предприятия: проблемы развития и повышения инновационной активности/ «Инновационный менеджмент в России: вопросы стратегического управления и научно-технологической безопасности»/ Рук. авторского колл. В.Л. Макаров, А.Е. Варшавский М.: Наука 2004.
13. Ежеленко В. Промышленная робототехника в России. Краткий обзор роботизации, проблем и перспектив внедрения промышленных роботов на отечественных предприятиях // Умное производство. 2012. №4. URL: https://www.stanoks.net/index.php?option=com_content&view=article&id=1573:2014-07-08-09-49-20&catid=49:articles&Itemid=192 (дата обращения: 16.01.2022).
14. Робототехника: фантастика, которая станет реальной. URL: <https://gazprombank.investments/blog/market/robotics/> (дата обращения: 17.01.2022).
15. Варшавский А. Е. Проблемы развития прогрессивных технологий: робототехника // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2017. Т. 8. № 4. С. 682–697. DOI: 10.18184/2079-4665.2017.8.4.682-697
16. Think You Know Industrial Robots? Think Again. URL: <https://www.forbes.com/sites/jimlawton/2015/11/10/think-you-know-industrial-robots-think-again/?sh=4c94707e8472> (дата обращения: 22.01.2022).

17. Варшавский А.Е. Основные тенденции и показатели развития робототехники // Концепции. 2015. № 1 (33). С. 16–25.
18. Executive Summary World Robotics 2019 Service Robots. IFR. URL: <http://www.ifr.org/service-robots/statistics/> (дата обращения: 16.01.2022).
19. Robotics and Automation Expects Strong Growth in 2022. URL: <https://www.vdma.org/viewer/-/v2article/render/39318854> (дата обращения: 16.01.2022).
20. Automatica. URL: <http://www.automatica-munich.com/link/en/28872362> (дата обращения: 22.01.2022).
21. Q3 Robot Orders Put 2021 on Track for Biggest Year Yet. URL: <https://www.automate.org/news/q3-robot-orders-put-2021-on-track-for-biggest-year-yet> (дата обращения: 16.01.2022).
22. China leads post-pandemic recovery. URL: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/china-leads-post-pandemic-recovery> (дата обращения: 16.01.2022).
23. Rise of the robots. URL: http://usa.chinadaily.com.cn/china/2016-07/30/content_26277038_3.htm (дата обращения: 16.01.2022).
24. World Robotics. URL: <https://ifr.org/news/korea-hits-new-record/> (дата обращения: 16.01.2022).
25. Strategic Research Agenda for Robotics in Europe. –SPARC. The Partnership for Robotics in Europe. URL: https://www.eu-robotics.net/sparc/upload/topic_groups/SRA2020_SPARC.pdf (дата обращения: 16.01.2022).
26. Robotics 2020. Multi-Annual Roadmap for Robotics in Europe/ Call 2 ICT24 (2015) – Horizon 2020. Release B 06/02/2015. URL: https://www.eu-robotics.net/cms/upload/downloads/ppp-documents/Multi-Annual_Roadmap2020_ICT-24_Rev_B_full.pdf (дата обращения: 16.01.2022).
27. Чуйков А. Эра болтунов. «Аргументы Недели», № 33 (274) от 25 августа 2011. URL: <https://argumenti.ru/society/n303/121611> (дата обращения: 16.01.2022).
28. Речменский В. Жизнь и смерть «красного пролетария». «Аргументы Недели», № 2 (294), 19 января 2012. URL: <https://argumenti.ru/toptheme/n323/150739> (дата обращения: 16.01.2022).
29. CNews Analytics выпускает первый обзор рынка промышленной робототехники. URL: https://www.cnews.ru/news/top/2021-07-26_snews_analytics_vyускает_pervyj (дата обращения: 20.01.2022).
30. Катышев П. Россия без роботов. Ведомости, 14.11.2016. URL: <https://www.vedomosti.ru/opinion/articles/2016/11/15/664876-robot-ne-smozhet> (дата обращения: 16.01.2022).
31. Leading suppliers of robots for industrial enterprises in Russia in 2021. URL: <https://www.statista.com/statistics/1251896/russia-industrial-robots-suppliers/> (дата обращения: 20.01.2022).
32. Коноховская А. Рынок промышленной робототехники в России и мире. Control Engineering Россия Июнь 2016. URL: <https://controleng.ru/wp-content/uploads/403.pdf> (дата обращения: 16.01.2022).
33. Global spending on robotics and drones in 2020 and 2023 URL: <https://www.statista.com/statistics/441948/forecast-for-robotic-market-spending-worldwide/> (дата обращения: 16.01.2022).
34. Инна Зубарева. Роботы получают льготы. 01.04.2014. «Российская Бизнес-газета» – Промышленное обозрение №941 (12). URL: https://vpk.name/news/107897_robotyi_poluchat_lgotyi.html (дата обращения: 16.01.2022).
35. Робототехника – глобальные перспективы, самые перспективные компании и проекты. URL: <https://utmagazine.ru/posts/7550-robototekhnika-globalnye-perspektivy-samyeperspektivnyekompanii-i-proekty> (дата обращения: 16.01.2022).
36. Робототехника – глобальные перспективы, самые перспективные компании и проекты. URL: <https://utmagazine.ru/posts/7550-robototekhnika-globalnye-perspektivy-samyeperspektivnyekompanii-i-proekty> (дата обращения: 16.01.2022).
37. Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Компоненты робототехники и сенсора». 2019. https://d-russia.ru/wp-content/uploads/2019/10/plan_robototekhnika-sensorika.pdf (дата обращения: 16.05.2022).
38. Кудрин А. Устойчивый экономический рост: модель для России – выступление на Гайдаровском форуме 13.01.2017. URL: <https://akudrin.ru/news/ustoychivyy-ekonomicheskij-rost-model-dlya-rossii-vystuplenie-na-gaydarovskom-forume-13-01-2016> (дата обращения: 16.01.2022).

ГЛАВА 2.

МИРОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

ВВЕДЕНИЕ

Использование промышленных роботов в производстве началось в 1961 г., и затем, благодаря постоянному развитию технологий, машинного обучения, искусственного интеллекта, Промышленного Интернета вещей (ПоТ), а также Интернета вещей (IoT), значительно расширилось. Промышленные роботы могут быть запрограммированы на выполнение опасных и повторяющихся задач со стабильной точностью. Они помогают снизить потери сырья, оптимизировать эксплуатационные расходы и повысить производительность. Роботы снижают производственные затраты и время цикла в обрабатывающей промышленности, улучшают качество и надежность продукции, обеспечивают лучшее использование производственных площадей, сокращают отходы и повышают безопасность на рабочем месте [1].

Применение промышленных роботов целесообразно для автоматизации повторяющихся, опасных или трудных, требующих высокой степени точности или частоты, высокоскоростных операций, а также при мелкосерийном производстве. Автоматизация становится все более применимой к задачам с небольшим объемом [2]. Возможности ПР постоянно совершенствуются, они могут выполнять более сложные и разнообразные задачи с наибольшей скоростью и точностью [3].

Благодаря постоянному развитию технологий и переходу к новому этапу развития – 4-й промышленной революции (Industry 4.0) применение роботов все больше расширяется [4]. Ускорение цифровизации и автоматизации, а также упрощение использования промышленных роботов стимулирует их распространение. Если раньше наибольшим спросом ПР пользовались в автомобильной и электронной промышленности, то в настоящее время они находят применение в медицине, пищевой, аэрокосмической и других отраслях. Тем не менее, в автомобильной промышленности все еще используется наибольшее количество роботов [5].

В статье проведен сравнительный анализ применения ПР в разных отраслях промышленности (автомобильная, пищевая, химическая, электронная и др.). Информационной базой послужили данные Международной федерации робототехники (International Federation of Robotics), Европейской экономической комиссии ООН (UNECE), Ассоциации робототехники (Robotic Industries Association), а также отчеты и материалы конкретных ведущих робототехнических компаний (Fanuc, Kuka, ABB, Yaskawa Motoman, Kawasaki и др.), научные публикации российских и зарубежных авторов.

Проведен анализ основных тенденций и направлений развития промышленных роботов, а также проблем, связанных с их распространением. Рассмотрена динамика мирового парка ПР в период 1998–2020 гг., структура парка роботов по регионам (Европа, Америка, Азия и Австралия) в период 2004–2020 гг., а также ежегодные объемы и структура мировых продаж роботов по ключевым отраслям промышленности в 2009–2020 гг.

Проанализированы основные задачи ПР, выполняемые ими в этих отраслях, и направления их использования. Приведена динамика парка роботов по отраслям промышленности в различных странах (Япония, США, Южная Корея, Китай, Германия и др.). Глава подготовлена на основе статьи авторов*.

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ РОБОТОТЕХНИКИ

Промышленная робототехника является неотъемлемой частью обрабатывающей промышленности, она используется во многих задачах, требующих высокой точности, скорости и выносливости.

Благодаря ускоряющимся темпам автоматизации промышленные роботы распространяются не только в развитых странах, но и в странах с развивающейся экономикой. Кроме того, увеличивается ассортимент и типы роботов – от гибких механических конечностей до умных машин, которые могут работать вместе с людьми. Поскольку компоненты становятся меньше и сложнее, роботы могут справляться со сложностями производства лучше, чем люди. С их помощью достигается повышение качества выпускаемой продукции.

При этом наблюдается значительный рост использования шарнирных (сочлененных) роботов с целью обеспечения точности работы на линиях сборки; декартовых (линейных или порталных) роботов для различных промышленных применений, в том числе, в обработке материалов и сборке; параллельных (delta) роботов, используемых в пищевой промышленности для сортировки и упаковки и др.; SCARA роботов (селективная совместимая монтажная роботизированная рука), используемых для высокоскоростных точных операций – уплотнения, распределения, сборки и проч. [6].

За период 1998–2020 гг. мировой парк роботов увеличился в 4,2 раза – с 720,4 тыс. ед. в 1998 г. до 3015 тыс. ед. в 2020 г. (рис. 1). Фактором, способствующим росту парка роботов, является переход в некоторых отраслях промышленности от производства небольшого ассортимента товаров большими партиями к широкому ассортименту товаров небольшими партиями.

Основной прирост парка промышленных роботов в мире происходит за счет роста парка в странах Азии и Австралии. Доля этого региона в мировом парке роботов выросла с 52,2% (443,2 тыс. ед.) в 2004 г. до 63,4% (1912 тыс. ед.) в 2020 г. Продажи ПР в Азии выросли за счет таких стран, как Китай (ежегодные отгрузки ПР в 2020 г. выросли более чем в 48 раз по сравнению с 2004 г. – с 3493 ед. в 2004 г. до 168,4 тыс. ед. в 2020 г.), Индия (в 11 раз – с 369 ед. до 4112 ед., соответственно) и Южная Корея (в 6,5 раза – с 4660 ед. до 30,5 тыс. ед. за указанный период).

В то же время доля европейских стран в мировом парке роботов сократилась с 32,8% (279 тыс. ед.) до 20,3% (611,7 тыс. ед.). Как видно из рис. 2, существенное изменение региональной структуры парка произошло в результате мирового кризиса 2008 г.: если до 2008–2009 гг. доля европейских и американских стран повышалась, а стран Азии и Австралии снижалась, то после кризиса тенденции изменились в противоположном направлении.

* Варшавский А.Е., Дубинина В.В. Мировые тенденции и направления развития промышленных роботов. МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2020; 11(3). С. 294–319. <https://doi.org/10.18184/2079-4665.2020.11.3.294-319>.

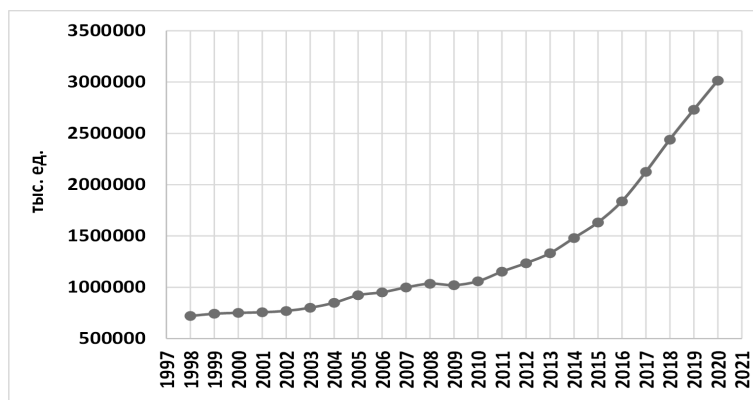


Рис. 1. Динамика мирового парка промышленных роботов, 1998–2020 гг., тыс. ед.

Источник: авторская разработка по данным UNECE и IFR. Press releases 1999–2021.

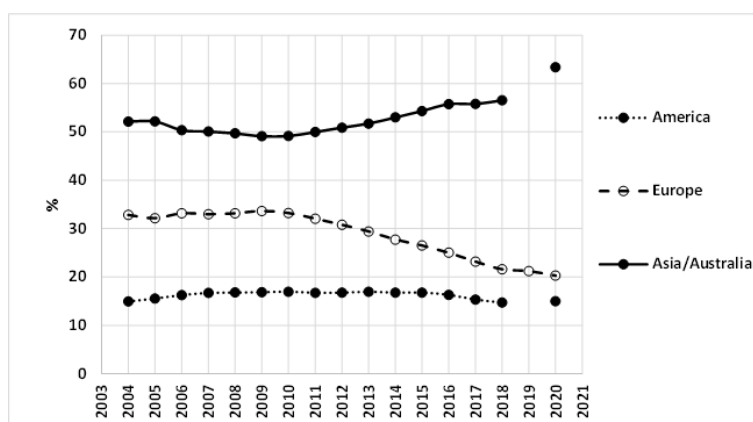


Рис. 2. Динамика региональной структуры мирового парка промышленных роботов (Азия и Австралия, Европа, Америка), 2004–2020 гг.

Источник: авторская разработка по данным [16].

В последнее время роботизация стала доступна даже в новых индустриальных странах (Вьетнам, Филиппины, Индонезия, Малайзия, Индия и Таиланд). Так, количество установленных промышленных роботов в Индии в 2020 г. составило 4,1 тыс. ед., в Таиланде – 2,9 тыс. ед., во Вьетнаме – 1,8 тыс. ед., в Малайзии – 1,4 тыс. ед. [7].

Внедрение роботизации в производственные процессы повышает конкурентоспособность экономики. В условиях ускоренного обновления ассортимента продукции становится очень важным решение проблем, связанных с усилением операционной реструктуризации производства для выпуска новых изделий, улучшением их качества и снижением материальных затрат. Эти проблемы успешно решаются в рамках современных гибких производственных систем, которые снижают потребность в рабочей силе [8]. Ожидается, что в будущем, по-видимому, появятся технологии, не требующие обслуживающего персонала, полностью исключая ручной труд при транспортировке, складировании, на вспомогательных операциях и т.п. [9].

К основным областям использования роботов относятся автомобильная, электронная, пищевая, фармацевтическая, аэрокосмическая, металлургическая, химическая промышленность, производство пластмассы и резины. При этом, если ранее роботы

использовались только в процессах массового производства в пищевой и автомобильной промышленности, то, поскольку робототехнические системы стали более доступными с точки зрения стоимости и размера в последние годы, в настоящее время они широко используются в небольших производственных процессах, таких как производство фармацевтических препаратов и лекарств и др. В табл. 1 представлены ежегодные объемы мировых продаж ПР в следующих отраслях промышленности: автомобильная, металлургическая, химическая, электротехническая/электронная, пищевая.

Таблица 1

Динамика ежегодных мировых продаж промышленных роботов по ключевым отраслям промышленности, 2010–2020 гг.

Отрасль	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
<i>Автомобильная промышленность, тыс. ед.</i>	39	59,7	63,2	69,4	94	98	103,3	125,7	116	105	80
индекс роста, 2010 г. = 100%	100	153	162	178	241	251	265	322	297	269	205
темп роста, % к предыдущему году	103,1	53,1	5,9	9,8	35,4	4,3	5,4	21,7	-7,7	-9,5	-23,8
<i>Электроника и электротехника, тыс. ед.</i>	32	37,7	32,7	36,2	46	65	91,3	121,3	113	88	109
индекс роста, 2010 г. = 100%	100	118	102	113	144	203	285	379	353	275	341
темп роста, % к предыдущему году	193,6	17,8	-13,3	10,7	27,1	41,3	40,5	32,9	-6,8	-22,1	23,9
<i>Металлообработка и машиностроение, тыс. ед.</i>	9	14,1	14,1	16,5	21	29,5	28,7	44,5	43,5	44	41
индекс роста, 2010 г. = 100%	100	157	157	183	233	327	319	495	483	489	456
темп роста, % к предыдущему году	69,8	56,7	0,0	17,0	27,3	40,5	-2,7	55,1	-2,2	1,1	-6,8
<i>Химикаты/резины/пластмассы, тыс. ед.</i>	11	10,5	11,4	12,2	17	17,3	16	21	20	19	19
индекс роста, 2010 г. = 100%	100	95	104	111	155	157	145	191	182	173	173
темп роста, % к предыдущему году	...	-4,5	8,6	7,0	39,3	1,8	-7,5	31,3	295,2	-5	0
<i>Пищевая промышленность, тыс. ед.</i>	4	4,65	4,9	6,2	7	7	8,2	10	12	11	12
индекс роста, 2010 г. = 100%	100	116	123	155	175	175	205	250	300	275	300
темп роста, % к предыдущему году	21,2	16,3	5,4	26,5	12,9	0,0	17,1	22,0	20	-8,3	9,1

Источник: авторская разработка по данным [16].

За период 2010–2020 гг. продажи роботов в автомобильной промышленности выросли в 2,1 раза, в электронной – в 4,2 раза, в пищевой – в 3 раза, в металлообработке и машиностроении – в 4,6 раза, в производстве химикатов/резины/пластмассы – в 1,7 раза. Следует отметить, однако, значительное изменение структуры продаж ПР: темп прироста продаж для автомобильной промышленности в 2017 г. составлял 21,7% по отношению к 2016 г., а в 2020 г. – сократился на 23,8% по сравнению с 2019 г. Для электронной и электротехнической промышленности продажи ПР в 2019 г. сократились на 22,1%, но в 2020 г. выросли на 23,9%, для пищевой они составили 9,1% в 2020 г. Такое изменение отраслевой структуры объемов продаж свидетельствует, очевидно, о новых тенденциях развития робототехники.

Структура мирового парка ПР по отраслям промышленности в 2013–2019 гг. представлена в табл. 2. Наибольшее число роботов установлено в автомобильной (923 тыс. ед.) и электронной промышленности (672 тыс. ед.). В мировом парке роботов существенно выросла доля прочих отраслей промышленности (с 7,6% в 2013 г. до 19,4% в 2015 г.), а доля химической промышленности и производства пластмасс сократилась (с 11,1% в 2013 г. до 9,6% в 2019 г.).

Таблица 2

Мировой парк роботов по отраслям промышленности и его структура, 2013–2019 гг.

Отрасль промышленности	Мировой парк роботов по отраслям промышленности, тыс. шт.						Структура, %					
	2013	2014	2015	2017	2018	2019	2013	2014	2015	2017	2018	2019
<i>Автомобильная</i>	500	560,8	623,1	762	847	923	44,6	43,9	36,4	47,0	48,7	48,8
темпа роста, % к предыдущему году	...	12,2	11,1	22,3	11,2	9,0	...	...	...	...	...	...
<i>Электронная и электротехническая</i>	250	269,5	328,6	509	597	672	22,3	21,1	19,2	31,4	34,3	35,5
темпа роста, % к предыдущему году	...	7,8	21,9	54,9	17,3	12,6	...	...	...	...	...	...
<i>Металлургическая</i>	120	135,2	160,9	...	...	...	10,7	10,6	9,4	...	...	...
темпа роста, % к предыдущему году	...	12,7	19	...	...	...	...	...	...	...	...	...
<i>Химическая промышленность и производство пластмасс</i>	125	134,3	150,9	171	176	182	11,1	10,5	8,8	10,5	10,1	9,6
темпа роста, % к предыдущему году	...	7,4	12,4	13,3	2,9	3,4	...	...	...	...	...	...
<i>Пищевая</i>	42	44,5	51,2	64	74	81	3,7	3,5	3,0	3,9	4,3	4,3
темпа роста, % к предыдущему году	...	6	15,1	25,0	15,6	9,5	...	...	...	...	...	...
<i>Прочие отрасли</i>	85	88	316,9	...	...	...	7,6	6,9	18,5	...	...	...
темпа роста, % к предыдущему году	...	3,5	260,1	...	...	...	...	...	...	...	...	...
<i>Всего</i>	1122	1278	1711	1622	1741	1892	100	100	100	100	100	100
темпа роста, % к предыдущему году	...	9,8	32,4	-5,2	7,4	8,7	...	...	...	...	...	...

Источник: авторская разработка по данным [10].

В качестве примера изменения структуры продаж ПР в регионах можно рассмотреть Северную Америку, где продажи роботов в основном приходились на автомобильную промышленность (67% в 2016 г., см. табл. 3), в отличие от мировых тенденций, где ее доля сокращается и составляет менее 40%. При этом увеличилась доля продаж для производства полупроводников и электроники, с 3% в 2005 г. до 5% в 2016 г., а доля продаж роботов для металлургии сократилась с 10% в 2005 г. до 7% в 2016 г.

Далее будут рассмотрены особенности применения роботов в ключевых отраслях обрабатывающей промышленности – автомобильной, электронной и электротехнической, металлургической, медицинской и фармацевтической, пищевой, химической и аэрокосмической промышленности.

Таблица 3

Структура продаж роботов в Северной Америке по отраслям промышленности, %

Отрасль промышленности	2005	2013	2016
Автомобильная промышленность	69	56	67
Металлургическое производство	10	11	7
Пищевые и потребительские товары	3	7	5
Полупроводники/электроника/фотоника	3	4	5
Науки о жизни/фармацевтика / биомедицина	2	6	4
Производство резиновых и пластмассовых изделий	1	2	2
Прочие	11	14	10
Всего	100	100	100

Источник: авторская разработка по данным [16].

АВТОМОБИЛЬНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Автомобильная промышленность является крупнейшим в мире потребителем роботов: в 2019 г. на ее долю приходилось 60% от общего объема поставок роботов [11]. Многие задачи в автомобильной промышленности, которые раньше выполнялись людьми, теперь выполняются роботами, что позволило значительно повысить масштабы производства в отрасли. В качестве примера можно привести использование роботов в японской автомобильной промышленности.

Японские автопроизводители начали использовать промышленные роботы в конце 1970-х гг., и после 1980 г. их применение возросло благодаря использованию более совершенных робототехнических технологий. Япония занимает одно из лидирующих мест по развитию робототехники, поскольку создается множество промышленных роботов для использования на собственном рынке. Внутри страны роботы обеспечили решение проблемы с нехваткой работников в автомобильной промышленности, включая квалифицированных специалистов по сварке. В 2020 г. на долю японских производителей приходилось 45% мировых поставок роботов [12].

Инвестиции в производство новых автомобилей и модернизацию привели к росту спроса на роботов. За последние несколько лет автомобильная промышленность значительно увеличила инвестиции в промышленные роботы по всему миру [13]. Если в начале XXI в. в автомобилестроении роботы были задействованы в технологическом цикле в 45% всех операций, то, по данным IFR, к началу 2013 г. этот показатель составил более 80% [14, 15]. Наиболее распространенными задачами для роботов в 2015 г. были обработка материалов (33%) и точечная сварка (26%).

В частности, в автомобильной промышленности США за 2010–2015 гг. было установлено более 60 тыс. промышленных роботов, в Китае за тот же период – почти 90 тыс. ед. [16]. В Японии продажи роботов в автомобильной промышленности за период 2012–2020 гг. выросли в 1,3 раза – с 9062 ед. до 11602 ед.

В 2015 г. во всем мире было продано 95 тыс. роботов для автомобильной промышленности, в Китае – 24 тыс. ед., в Южной Корее – 12,3 тыс. ед., в США – 12,27 тыс. ед., в Японии – 11,3 тыс. ед., в Германии – 10 тыс. ед. (табл. 4). Объем продаж ПР для автомобильной промышленности в 2015–2018 гг. наиболее существенно вырос в Германии и Китае

(в 1,6 раза), в Японии (1,5 раза), сократился в Южной Корее (на 10,3%). При этом темпы прироста продаж в большинстве стран были нестабильными, что связано с продолжающимся кризисом. В 2020 г. продажи ПР для автомобильной промышленности в мире значительно сократились: в Японии – на 31,8% по сравнению с 2019 г., в США – на 19%, в Китае – на 15,6%, в Германии – на 5,4%. Только в Южной Корее наблюдался рост продаж ПР (на 16,2%), однако в 2019 г. продажи сократились на 58% по сравнению с 2018 г.

Таблица 4

Объем продаж роботов для автомобильной промышленности в ряде стран, ед.

Страна	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
<i>Япония</i>	9062	7670	10 037	11 300	13 497	13 701	17 346	17 016	11 602
темпа роста, % к предыдущему году	...	-15,4	30,9	12,6	19,4	1,5	26,6	-1,9	-31,8
<i>Китай</i>	21 000	24 000	26 000	...	39 351	32 000	27 000
темпа роста, % к предыдущему году	14,3	8,3	...	...	-18,7	-15,6
<i>США</i>	10 591	10 200	13 218	12 270	15 790	14 874	15 246	12 960	10 494
темпа роста, % к предыдущему году	...	-3,7	29,6	-7,2	28,7	-5,8	2,5	-15	-19
<i>Германия</i>	10 000	...	...	15 673	10 226	9670
темпа роста, % к предыдущему году	-34,8	-5,4
<i>Южная Корея</i>	12 300	...	...	11 034	4635	5386
темпа роста, % к предыдущему году	-58	16,2

Источник: авторская разработка по данным [16, 72].

При этом в 2015 г. на автомобильных заводах России было установлено всего 220 роботов, в 2016 г. – 26 ед., что связано с сокращением спроса на автомобили. В 2017 г. на долю автомобильной промышленности России приходилось 37% продаж роботов в стране – 262 ед., в 2018 г. было установлено 390 роботов (в том числе на заводе КАМАЗ было задействовано 297 роботов [17]), в 2019 г. – 360 ед.

Уровень внедрения робототехники является важнейшим экономическим показателем, так как он отражает развитие и технологический прогресс страны. Для его оценки используется показатель «плотность роботизации», который рассчитывается как количество роботов на 10 тыс. занятых в отрасли. Например, в Японии плотность роботизации в автомобильной промышленности в 2019 г. составляла 1248 ед., в США – 1287 ед., в Германии – 1311 ед. (табл. 5).

Примеры использования роботов в автомобильной промышленности.

Промышленные роботы в автомобильной промышленности используются для автоматизации следующих процессов:

- сварка (дуговая, точечная) – одна из главных операций, в которых используются ПР в автомобильной промышленности (например, на заводе Mercedes роботы Кука сваривают держатель приборной панели);
- покраска – для этой операции ПР в автомобильной промышленности относительно мало используются, однако в настоящее время происходит быстрый рост их применения в этих целях;

Таблица 5

Плотность роботизации (ед. на 10 тыс. занятых) и индекс роста (%)
в автомобильной промышленности по странам

Страна	1993	2000	2006	2010	2011	2015	2016	2017	2018	2019
<i>Южная Корея</i>	...	...	...	1239	1100	1218	2145	2435	2589	...
индекс роста, 2011 г. = 100%	...	...	...	112,6	100	110,7	195,0	221,4	235,4	...
темп роста, % к предыдущему году	...	...	...	...	-11,2	10,7	76,1	13,5	6,3	...
<i>США</i>	393	587	830	1112	1104	1218	1261	1200	...	1287
индекс роста, 2011 г. = 100%	35,6	53,2	75,2	100,7	100	110,3	114,2	108,7	...	116,6
темп роста, % к предыдущему году	...	49,4	41,4	34,0	-0,7	10,3	3,5	-4,8	...	...
<i>Германия</i>	313	820	1220	1130	1176	1147	1131	1162	1270	1311
индекс роста, 2011 г. = 100%	26,6	69,7	103,7	96,1	100	97,5	96,2	98,8	108,0	111,5
темп роста, % к предыдущему году	...	162,0	48,8	-7,4	4,1	-2,5	-1,4	2,7	9,3	3,2
<i>Япония</i>	1481	1686	1820	1436	1584	1276	1240	1158	...	1248
индекс роста, 2011 г. = 100%	93,5	106,4	114,9	90,7	100	80,6	78,3	73,1	...	78,8
темп роста, % к предыдущему году	...	13,8	7,9	-21,1	10,3	-19,4	-2,8	-6,6	...	...
<i>Франция</i>	...	520	1160	...	590	940	1150	1156	...	...
индекс роста, 2011 г. = 100%	...	88,1	196,6	...	100	159,3	194,9	195,9	...	...
темп роста, % к предыдущему году	...	...	123,1	...	...	59,3	22,3	0,5	...	...
<i>Испания</i>	...	520	970	...	900	883	1051	990,0	...	...
индекс роста, 2011 г. = 100%	...	57,8	107,8	...	100	98,1	116,8	110,0	...	...
темп роста, % к предыдущему году	...	...	86,5	...	...	-1,9	19,0	-5,8	...	...
<i>Китай</i>	...	...	36	105	141	392	...	505	539	938
индекс роста, 2011 г. = 100%	...	...	25,5	74,5	100	278,0	...	358,2	382,3	665,2
темп роста, % к предыдущему году	...	...	...	191,7	34,3	178,0	...	...	6,7	74,0
<i>Италия</i>	458	850	1630	1229	1215	877	...	...	...	...
индекс роста, 2011 г. = 100%	37,7	70,0	134,2	101,2	100	72,2	...	...	...	...
темп роста, % к предыдущему году	...	85,6	91,8	-24,6	-1,1	-27,8	...	...	...	...
<i>Швеция</i>	317	540	590	...	425	734	...	...	...	...
индекс роста, 2011 г. = 100%	74,6	127,1	138,8	...	100	172,7	...	...	...	...
темп роста, % к предыдущему году	...	70,3	9,3	...	...	72,7	...	...	...	...
<i>Великобритания</i>	175	430	600	600	620	606	700	...	...	...
индекс роста, 2011 г. = 100%	28,2	69,4	96,8	96,8	100	97,7	112,9	...	...	...
темп роста, % к предыдущему году	...	145,7	39,5	0,0	3,3	-2,3	15,5	...	...	...
<i>Бразилия</i>	...	...	...	56	70	125	...	...	...	...
индекс роста, 2011 г. = 100%	...	...	...	80,0	100	178,6	...	...	...	...
темп роста, % к предыдущему году	...	...	...	...	25,0	78,6	...	...	...	...

Источник: авторская разработка по данным [16, 73, 74].

- сборка (сборка дверей, трансмиссий, дверных панелей, подшипников в коробке передач мотоцикла, автомобильных аккумуляторов и др.);

- литье под давлением;

- паллетирование;
- транспортировка, перемещение деталей, в том числе подъем и перемещение кузова автомобилей (например, робот Fanuc M-2000iA/2300 может поднимать/опускать предметы в вертикальном и горизонтальном направлениях, переворачивать их и т.п.);
- установка деталей (установка двигателей и подвески, тормозных шлангов, проводки, деталей кузовов, установка дверей, тяжелых амортизаторов и др.);
- контроль качества и тестирование (например, проверка корпусов коленчатых валов, тестирование автомобильных сидений, подушек безопасности);
- нанесение клея/герметика;
- очистка форм для литья (например, роботы Kuka на заводе BMW);
- снятие заусенцев;
- погрузочно-разгрузочные работы (например, робот Fanuc M-900iA/350 на заводе Audi).

В автомобильной промышленности используются роботы компаний Kuka, Fanuc, ABB, Kawasaki, Comau и др. Например, роботы Fanuc используются на автомобильных заводах Saab, Land Rover, Rolls-Royce, Chrysler, Mitsubishi, Volkswagen, Ford (робот R-2000iA/165F). В России роботы Fanuc используются на заводах КАМАЗ, НЕФАЗ, ГАЗ, УАЗ, VW Калуга, Sollers Auto. Для сборки на заводах Tesla и Porsche используются роботы Kuka, на заводах General Motors, Nissan и Audi – роботы Fanuc, у Ford – роботы Kawasaki, у Maserati – роботы Comau. Для покраски в компаниях Fiat, BMW, Volvo, Honda, Great Wall Automobile применяются роботы ABB, в Porsche и Mercedes Benz – роботы Kuka, в Toyota – роботы Kawasaki. Для сварки на заводах Hyundai и Nissan используются роботы Fanuc, на заводах Ford, Porsche, Mercedes Benz, Skoda, Volkswagen – роботы Kuka, на заводах Maserati – роботы Comau. Для сварки, погрузочно-разгрузочных работ, обработки и паллетирования применяются роботы Kuka на заводах Volkswagen, Mercedes-Benz, Ford, Audi, Porsche, Chrysler, Ferrari, Harley-Davidson (производство мотоциклов), BMW, Tesla, Ferrari, General Motors, ГАЗ, КАМАЗ, АвтоВаз, Renault, Peugeot, KIA, Skoda, Volvo, Seat, Hyundai. Около 160 промышленных роботов участвуют в производстве электромобилей Tesla [18].

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОННАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

В течение многих лет автомобильная промышленность была лидером по внедрению роботов на производствах. Однако по прогнозам ожидается, что основной объем продаж промышленных роботов придется на электротехническую и электронную промышленность, что объясняется ростом производства в этой отрасли, а также расширением круга задач, которые могут выполнять роботы, особенно при сборке электронных компонентов и оборудования. Роботы в электротехнической и электронной промышленности используются на протяжении всего производственного цикла – от резки металлических корпусов до сборки миниатюрных компонентов, нанесения герметика и клея, полировки поверхностей, проведения проверок качества, упаковки и укладки на поддоны готовых изделий. Сборка электроники требует очень быстрого и точного размещения миниатюрных и хрупких объектов. Кроме того, роботы должны быть способны выполнять последовательно несколько задач [19, 20].

Возрастающий мировой спрос на электронику, новую продукцию и технологии стимулирует инвестиции в развитие технологических процессов и увеличение производственных мощностей в отрасли, особенно в странах Азии.

Так, в Китае в 2019 г. инвестиции в электронное оборудование и оборудование связи выросли на 14,5% относительно 2018 г. [21]. Прямые инвестиции в электрическое и электронное оборудование в Южной Корее в 2019 г. выросли на 42,8% по отношению к 2018 г., в Индонезии – на 48,3%, в Индии – на 22,3%, в Сингапуре – на 6% [22].

Достижения в области захватов, технологий визуализации и датчиков силы означают, что роботы могут выполнять все более широкий спектр задач по производству, сборке и отделке. Например, роботы уже могут выбирать неотсортированные компоненты из корзин и монтировать компоненты под разными углами. Разработки в области датчиков и технологий ограничения мощности (которые обеспечивают замедление или остановку робота при контакте с работником) позволяют роботам совместно использовать рабочие пространства с сотрудниками. Эта гибкость особенно важна в электротехнической и электронной промышленности, где производственные циклы выпуска отдельных видов продукции часто длятся всего несколько месяцев [23].

В 2017 г. электротехническая и электронная промышленность должна была, согласно прогнозам, опередить автомобильную отрасль по количеству потребляемых промышленных роботов. Однако в 2018 г. мировой спрос на электронные устройства и компоненты существенно снизился, отрасль пострадала от торгового кризиса между США и Китаем.

Азиатские страны являются лидерами в производстве электронных продуктов и компонентов и, соответственно, предъявляют большой спрос на ПР. Так, в 2018 г. на долю Китая приходилось 43% от общего числа ПР в электронной/электротехнической промышленности, Южной Кореи – 19%, Японии – 17% [14]. В 2017 г. во Вьетнаме наблюдалось разовое увеличение количества установленных роботов, обусловленное несколькими крупными проектами (7080 ед.), однако в 2018 г. оно сократилось до 689 ед. (табл. 6). Наибольший рост продаж ПР в 2015–2020 гг. отмечается в Китае.

Таблица 6

Продажи роботов в электронной/электротехнической промышленности по странам за 2014–2020 гг. (ед.) и индекс роста продаж (%)

Страна	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
<i>Китай</i>	...	15 545	...	...	46 000	42 000	63 000
индекс роста, 2015 г. = 100%	...	100	...	...	295,9	270,2	405,3
<i>Япония</i>	...	11 700	10 881	...	17 346	15 677	13 374
индекс роста, 2015 г. = 100%	...	100	93,0	...	148,3	134	114,3
<i>Южная Корея</i>	...	11 145	...	...	20 114	17 937	15 578
индекс роста, 2015 г. = 100%	...	100	...	...	180,5	160,9	139,8
<i>США</i>	3327	5639	...	...	5284	3460	3710
индекс роста, 2015 г. = 100%	59,0	100	...	...	93,7	61,4	65,8
темп роста, % к предыдущему году	...	69,5	...	...	...	–34,5	7,2
<i>Тайвань</i>	...	3988	...	...	...	...	...
<i>Вьетнам</i>	7080	689	...	...

Источник: авторская разработка по данным [16].

В течение последних лет в электротехнической/электронной промышленности Южной Кореи наблюдался значительный рост использования роботов. Рост интереса к ПР связан с увеличением производства потребительских электронных устройств (мобильных телефонов и планшетов). Плотность роботизации в электротехнической/электронной промышленности страны наиболее велика – она выросла с 365 ед. в 2015 г. до 533 ед. в 2017 г. (табл. 7). Можно сказать, что плотность роботизации менялась неравномерно. Например, в Германии в 2017 г. она выросла в 2,8 раза по сравнению с 2002 г., в Швеции – в 3,5 раза, в Италии – в 3 раза за тот же период времени, а в Китае плотность роботизации в этой отрасли выросла в 2017 г. в 6 раз по сравнению с 2008 г.

Электроника и технологии стремительно развиваются, поэтому требуются роботы, которые можно быстро и легко интегрировать в производство различных видов электронной техники, включая мобильные телефоны, компьютеры, устройства ввода, аудио/видео аппаратуру и многое другое. Например, в компании Philips, где производятся электробритвы, задействовано больше роботов, чем людей (на 1 работника приходится примерно 14 роботов) [26].

Таблица 7

Плотность роботизации в электронной/электротехнической промышленности по странам, ед.

Страна	2002	2008	2011	2015	2017
Южная Корея	...	...	...	365	533
Япония	527	...	...	211	225
Германия	68	240	255	161	191
США	...	200	280	...	117
Франция	20	...	...	...	...
Великобритания	10	...	...	...	...
Италия	52	...	...	...	160
Швеция	51	...	...	142	180
Китай	...	5	11	...	30

Источник: авторская разработка по данным [24, 25].

Тестирование продукции в электронной промышленности является основной задачей, на которую ежегодно компании тратят миллиарды долларов с целью проверки качества продукции (по данным отчетов компаний, почти 35% общего бюджета в электронной промышленности отводится на тестирование пользовательских интерфейсов, сенсорных экранов, встроенных в устройства и т.п.). Роботы также очень быстро комплектуют и упаковывают собранный продукт. Их использование позволяет резко повысить производительность труда (например, для установки металлических зажимов на пластиковые детали в компании First Engineering используются роботы ABB IRB 1410, что позволило на 75% увеличить производство продукции [27]). Кроме того, в производстве электроники часто используются сборочные роботы. Например, робот Fanuc M-1iA может собирать детали весом менее 0,5 кг [28]. Также для сборки применяются роботы Fanuc M-1iA/0.5A, SR-3iA, SR-6iA.

Примеры использования роботов в электротехнической и электронной промышленности.

Промышленные роботы в электротехнической и электронной промышленности используются для автоматизации следующих процессов:

- проверка и тестирование продукции (одна из главных операций, в которых используются ПР в электротехнической/электронной промышленности; роботы тестируют сенсорные экраны, кнопки и другие устройства управления);
- сборка (роботы комплектуют и упаковывают собранный продукт на высокой скорости);
- обработка печатных плат (заполнение и покрытие плат);
- сварка;
- полировка и шлифовка;
- покраска;
- упаковка устройств и их паллетирование (роботы комплектуют и упаковывают собранный продукт на высокой скорости, упаковывают обернутые термоусадочной пленкой компоненты; отдельные упаковки автоматически упаковываются в коробки, которые укладываются на поддоны);
- селективная и высокоточная пайка (определение положения дорожек на плате, их позиционирование и пайка [29]);
- погрузочно-разгрузочные работы (например, роботы упаковывают обернутые термоусадочной пленкой компоненты);
- штамповка;
- нанесение герметика.

В электронной/электротехнической промышленности используются роботы компаний Fanuc, Kuka, ABB и др. Для сборки в компании Apple применяются роботы Fanuc M-1iA и LR Mate 200iC, в компаниях Rapoo Technology и Elektro-Praga – роботы ABB [30]. Для селективной и высокоточной пайки в компании Alnea используются роботы Kuka, они удерживают плату и управляют движением паяльника [31]. Для полировки и упаковки устройств в компании Fastlog AG применяются роботы Fanuc M-20iA/10L и M-10iA. Для сварки, шлифовки, полировки и покраски в компаниях Apple, Dell, Foxconn, Hewlett Packard, Motorola и Nokia используются роботы ABB и Fanuc.

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Металлургическая промышленность является одной из самых универсальных отраслей промышленности и обладает потенциалом для автоматизации на основе роботов. Обработка металлов является основной операцией для внедрения промышленных роботов. Автоматизация металлургического производства, включая загрузку и разгрузку, сводит к минимуму риск человеческой ошибки, позволяет повысить производительность и безопасность [32].

В 2018 г. на долю этой отрасли приходилось 10% от общего числа установленных роботов. При этом в Финляндии на долю металлургической промышленности приходилось 44% от количества установленных роботов в 2018 г., в Швеции – 42%, в Швейцарии – 40%, в Бельгии – 30%, в Австрии – 27%, в Италии – 26%, в Дании – 21% [14]. В 2015 г. парк роботов в металлургической промышленности во всем мире составил 34 614 ед., в Китае – 10 321 ед., в Южной Корее – 6823 ед., в Японии – 5000 ед., в Германии – 2415 ед., в США –

2204 ед. (по данным IFR, 2016). Количество установленных роботов достигло 44 тыс. ед. в 2017 г., а затем несколько снизилось до 43,5 тыс. ед. в 2018 г. В металлургической промышленности в России в 2017 г. было установлено 157 роботов [33].

Примеры использования роботов в металлургической промышленности.

Промышленные роботы в металлургической промышленности используются для автоматизации следующих процессов:

- манипулирование;
- сварка;
- обработка деталей (например, корпусов турбин для турбокомпрессоров) и металлоизделий (зачистка и снятие заусенцев; роботы устраняют острые кромки, обрабатывают контуры, закругляют кромки);
- подбор и размещение предметов (например, загрузка лазера для обработки труб и др.);
- выполнение трехмерных распилов (роботы заостряют медные штанги, управляя пилой);
- загрузка станка;
- гравировка и маркировка;
- полировка;
- шлифовка;
- отливка расплавленного металла (роботы заполняют песчаные формы жидким металлом, извлекают литые детали, удаляют использованный желоб и устанавливают на его место новый);
- очистка инструментов и деталей;
- резка (например, резка листовых плоских заготовок, труб и других заготовок с разной формой поверхности).

В металлургической промышленности используются роботы компаний Kuka, Kawasaki, Fanuc и др. [34]. Например, для манипулирования в компаниях Maba Track Solutions и KSM Castings применяются роботы Kuka KR500-3 и KR QUANTEC nano F exclusive. В России в компании Brassco используются роботы Fanuc. Для загрузки станка и автоматического позиционирования изделий в компании Белфин Роботикс используются роботы Fanuc. Для отливки расплавленного железа в компании Georg Fischer используются роботы Kuka KR1000 titan F. Для зачистки и снятия заусенцев, обработки металла, полировки и шлифовки изделий в компаниях GrindMaster, Heidenreich & Harbeck и IDS Casting Service GmbH используются роботы Fanuc и Kuka. Для сварки в компаниях Fronius и Meiller Aufzugtüren используются роботы Kuka и Kawasaki F-серии. Для выполнения трехмерных распилов в компании Wieland Anlagentechnik используются роботы Kuka KR FORTEC 360 и т.д.

ФАРМАЦЕВТИЧЕСКАЯ И МЕДИЦИНСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Целью робототехники в этих отраслях промышленности является замена людей при выполнении повторяющихся или опасных задач. Внедрение робототехники нацелено на создание безопасной асептической среды, практически без вмешательства человека.

Роботы помогают заменить работников в опасных средах, сократить расходы на обучение, устранить человеческие ошибки [35]. Фармацевтическая и медицинская промышленность уделяет все больше внимания безопасности продукции и защите ее от подделок. Контроль производства по всей цепочке поставок до точки продажи способствует более широкому использованию робототехники в отрасли.

В медицинской промышленности роботы используются для наполнения флаконов, упаковки и укладки на поддоны фармацевтических препаратов, они загружают и выгружают литьевые машины, собирают медицинские устройства и полируют имплантаты. В фармацевтическом производстве роботы обрабатывают бутылки в процессе культивирования клеток, загружают и выгружают автоклавы и упаковочные машины, а также дезинфицируют шприцы. Из-за потенциальных опасностей и больших объемов некоторые больницы и крупные медицинские учреждения используют робототехнику для распределения лекарств, а также для смешивания потенциально опасных лекарств от рака. В исследовательских лабораториях роботы проводят анализ проб, автоматизируют движение пробирок, тестируют образцы крови. Роботы также выдают лекарства в аптеках. Производители стоматологических приборов используют роботов в основном для сортировки и упаковки в конце производственной линии. Компании, производящие персональные медицинские приборы и очки, используют роботы для ухода за машинами, загрузки сырья в машины и выгрузки готовой продукции [36, 37].

Примеры использования роботов в фармацевтической и медицинской промышленности.

Промышленные роботы в фармацевтической и медицинской промышленности используются для автоматизации следующих процессов:

- проведение лучевой терапии для лечения опухолей;
- проведение рентгеновских исследований;
- обработка материалов;
- сбор и приготовление (лекарств, вакцин, таблеток);
- паллетирование;
- тестирование и регистрация результатов;
- упаковка вакцин и лекарств;
- очистка оборудования;
- шлифовка и полировка протезов.

В фармацевтической и медицинской промышленности используются роботы компаний Stäubli, ABB, Kuka, Wittmann, Denso, Epson и др. Например, для выполнения сбора, упаковки и укладки на паллеты таблеток и других лекарств в компаниях AstraZeneca, Glaxo Smith Kline, Johnson & Johnson и Schering-Plough применяются роботы ABB, а в компании Bayer – роботы Stäubli моделей RX160, TX200 и RX170. Для проведения лучевой терапии для лечения опухолей в компании Accura применяются роботы Kuka. Для паллетирования и упаковки вакцин и лекарств в компании Novartis применяются роботы ABB. Для шлифовки и полировки протезов в компаниях Aescular и BSN medical используются роботы Kuka. Для обработки материалов, тестирования, регистрации результатов и очистки оборудования в компании NoviSystems Ltd. применяются роботы Epson. Для проведения

рентгеновских исследований в компании Siemens используются роботы Kuka KR QUANTEC. Для сбора таблеток и размещения их в блистерной полости в компании Janssen-Ortho LLC используется робот Epson EL650 [38]. Для приготовления лекарств используется робот Denso Wave VS-S2. Роботы Kuka применяются в роботизированной радиохирургической системе Cyberknife, которая позволяет лечить неоперабельные, сложные для хирургии опухоли. Для изготовления ингаляторов в компании Forteq Healthcare используются роботы Wittmann и т.д. [39].

ПИЩЕВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

На протяжении многих лет пищевая промышленность рассматривается как значительный потенциальный потребитель роботов, в основном из-за большого количества операций, выполняемых вручную в этом секторе. Однако количество используемых там роботов еще не столь велико, так как затраты на труд здесь ниже, чем в других отраслях (таких как автомобилестроение и др.), что затрудняет обоснование необходимости внедрения автоматизации. Несмотря на то, что рыночная стоимость робототехники в пищевой промышленности, как ожидается, вырастет к 2022 г. с 1,3 млрд до 2,5 млрд долл., это по-прежнему составляет лишь менее 2% от общих мировых расходов на робототехнику [40].

Первый промышленный робот для упаковки продуктов появился в 1950 г. и использовался в компании TetraPak (Швеция) для перемещения корзин с пакетами-пирамидами. В 1970 г. началось создание первых роботизированных участков группового упаковывания продуктов, а в 1986 г. был применен первый роботизированный комплекс в пищевой промышленности России. Роботизированная машина Lokompack использовалась для упаковки шоколадных конфет. Первый отечественный роботизированный технический комплекс (РТК) упаковывал эклеры в коробки.

В 1989 г. компания OttoHansell на своей роботизированной машине для упаковки шоколадных конфет впервые применила систему технического зрения (СТЗ), что позволило укладывать предварительно неориентированные кондитерские изделия. В 2007 г. был разработан робот Smart Packer для упаковки куриных яиц по 24 или 30 шт. в специальные контейнеры, которые затем группировались по 15 шт. и укладывались в коробки; также робот наполнял коробки специальным пенопластом для обеспечения защиты содержимого при транспортировке [41].

Промышленные и коллаборативные роботы в пищевой промышленности все чаще используются для первичной и вторичной обработки [42].

Наиболее важным достижением роботизированных технологий для обработки пищевых продуктов стало внедрение более совершенных захватов. Сейчас существуют мягкие захваты, которые могут быстро и осторожно обращаться с пищевыми продуктами – такими, как фрукты и овощи. Захваты других типов, например, вакуумные, также эффективны при работе с деликатными предметами или предметами неправильной формы; многие захваты также сочетаются с надежной технологией роботизированного зрения для управления роботизированной рукой, что позволяет компенсировать изменения формы изделия [43, 44].

Использование роботов в пищевой промышленности происходит, в основном, для обработки пищевых продуктов. Прогнозируется, что мировой рынок автоматизации и робототехники в секторе обработки пищевых продуктов и напитков будет устойчиво расти в будущем. Для выполнения операций по упаковке и паллетизации продукции применяется примерно 50% роботов пищевой промышленности. Роботы занимаются погрузкой/разгрузкой пакетов, коробок и поддонов. Современная робототехника позволяет значительно повысить эффективность сбора заказов и упаковки. Например, сразу после того, как заказ размещен в Интернете, робот может определять местоположение конкретного продукта, правильно упаковывать его и предоставлять клиенту информацию о доставляемом продукте. Роботы для упаковки пищевых продуктов освобождают работников от повторяющихся и утомительных задач, вместо этого они могут выполнять другие более важные функции [45, 46].

По данным IFR, в Европе используется больше всего роботов в пищевой промышленности (свыше 30 тыс. ед. в 2017 г.). Остальные страны также начинают использовать роботов в этой отрасли. Так, в 2012 г. США, Италия, Германия, Япония и Китай приобрели наибольшее количество роботов для обработки пищевых продуктов и напитков (США – 672 ед., Италия – 614 ед., Германия – 588 ед., Япония – 584 ед., Китай – 482 ед. [47]). При этом наблюдается рост продаж: в странах Европы они выросли с 2480 ед. в 2013 г. до 3766 ед. в 2017 г., в США – с 769 ед. в 2010 г. до 2438 ед. в 2018 г., в Японии – с 584 ед. в 2012 г. до 944 ед. в 2019 г. (табл. 8). В 2018 г. наиболее существенно выросли продажи ПР для пищевой промышленности в США (в 2,3 раза по сравнению с 2013 г.) и Японии (в 1,5 раза за тот же период). Следует отметить, что, начиная с 2016 г., темпы прироста продаж ПР для пищевой промышленности во многих странах заметно возросли.

Таблица 8

Объем продаж роботов в пищевой промышленности (ед.) и индекс роста продаж (%)

Страна/регион	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
<i>Япония</i>	584	735	679	516	683	778	1068	944
индекс роста, 2013 г. = 100%	79,5	100	92,4	70,2	92,9	105,9	145,3	128,4
темпы роста, % к предыдущему году	25,9	-7,6	-24,0	32,4	13,9	37,3	-11,6
<i>США</i>	769	800	672	1080	972	1025	1114	1523	2438	...
индекс роста, 2013 г.=100%	71,2	74,1	62,2	100	90,0	94,9	103,1	141,0	225,7	...
темпы роста, % к предыдущему году	...	4,0	-16,0	60,7	-10,0	5,5	8,7	36,7	60,1	...
<i>Европа</i>	2480	3192	2772	3412	3766	...	...
индекс роста, 2013 г.=100%	100	128,7	111,8	137,6	151,9	...	...
темпы роста, % к предыдущему году	28,7	-13,2	23,1	10,4	...	...
<i>Всего в мире</i>	6200	7056	6853	8194	9724	...	...
индекс роста, 2013 г.=100%	100	113,8	110,5	132,2	156,8	...	...
темпы роста, % к предыдущему году	13,8	-2,9	19,6	18,7	...	...

Источник: авторская разработка по данным [48, 49].

По данным Reuters, поставки роботов компаниям, производящим продукты питания и товары потребления, в 2018 г. выросли на 60% по сравнению с 2017 г. [50]. По данным Ассоциации технологий упаковки и обработки (Association for Packaging and Processing

Technologies), 94% операторов по упаковке пищевых продуктов уже используют робототехнику [51].

Плотность роботизации в среднем в европейских странах увеличилась с 62 ед. в 2013 г. до 84 ед. в 2017 г. (рост на 35%) [52]. Самая высокая плотность роботизации наблюдалась в 2020 г. в Нидерландах – примерно 257 ед. (табл. 9), затем идут Швеция, Дания и Италия. Это страны с относительно высокими затратами на рабочую силу. В Великобритании и Германии затраты на рабочую силу в пищевой промышленности ниже.

Таблица 9

Плотность роботизации в пищевой промышленности по странам, ед.

Страна	2008	2011	2017	2020
Германия	55	57	80	97
США	40	50	...	89
Япония	25	23	...	61
Южная Корея	13	21	...	...
Китай	3	7	...	13
Швеция	...	...	174	190
Дания	...	...	174	185
Бельгия	...	...	82	93
Италия	...	...	145	183
Франция	...	...	55	...
Великобритания	...	...	40	44
Нидерланды	...	...	...	257

Источник: авторская разработка по данным [16].

По данным IFR, рост использования роботов в пищевой промышленности ожидается в следующих областях:

- производство замороженных и охлажденных продуктов (объем замороженных и охлажденных продуктов составлял более 16 млрд евро в 2011 г. в Европе – около 40% мирового рынка);
- производство готовых блюд (готовые блюда составляют почти 43% продаж замороженных и охлажденных продуктов; ожидается, что только европейский рынок будет расти на 2,5–3% в год);
- производство кондитерских изделий (считается, что Китай является потенциальным важным рынком [53]).

Примеры использования роботов в пищевой промышленности.

Промышленные роботы в пищевой промышленности используются для автоматизации следующих процессов:

- поднятие предметов и размещение их на линии упаковывания;
- обработка продукции (например, теста в пекарне; в индустрии напитков роботы очищают бутылки, подсчитывают их, заполняют и укладывают на конвейерную ленту);
- паллетирование (укладка на поддоны печенья, напитков, макаронных изделий, сладостей и других предметов);
- разгрузка поддонов;
- нарезка продукции (например, нарезка сырной продукции, тортов, сырых продуктов и т.д.; роботы способны нарезать продукты одинаковой формы);

- разделка мяса;
- укладка и перемещение готовой продукции (например, кондитерских изделий, пиццы и др.);
- сортировка и отбраковка продукции (роботы сортируют различные фрукты и овощи, дифференцируя их в соответствии с размером, цветом, формой и типом);
- упаковка продукции (например, рулетов из слоеного теста с шоколадом и сливками, буханок хлеба в коробки, круассанов и сыров в пластиковые лотки, сэндвичей, эклеров, конфет и шоколада);
- проверка и контроль качества (овощей и фруктов, хлебобулочных изделий; роботы используются для контроля качества путем отбора гнилых или неоптимальных продуктов перед упаковкой);
- работа в морозильных и холодильных камерах;
- украшение продуктов (роботы могут украсить несколько продуктов одинаково или разрезать продукты на сложные формы).

В пищевой промышленности используются роботы компаний Yaskawa Motoman, ABB, Fanuc, Kuka, Comau, Stäubli, Epson и др. Например, для сбора, упаковки и укладки на паллеты продуктов питания и напитков в компаниях Nestlé, Unilever, Cadbury, Coca-Cola, Budweiser используются роботы ABB, Kuka и Fanuc, а в компаниях Bavaria Brauerei и Kiviks Musteri Stenhamra – роботы Yaskawa Motoman. Для нарезки продукции в компании A-ware применяются роботы Fanuc. Для подбора и размещения предметов в компании Biscuiterie Thijs используются роботы Fanuc. Для обработки продукции в компании Freixenet применяются роботы Fanuc. Для упаковки и паллетирования готовой продукции в компании Русагро используются роботы Kuka. Для обработки и упаковки готового печенья применяются роботы Epson. Для перемещения и укладки готовой продукции на заводе Charnwood Foods применяются роботы Yaskawa Motoman. Для декорирования движущихся по конвейеру тортов в компании Unifiller используется робот Deco-Bot. Для украшения пирожных, пирогов и тортов используются роботы Epson. Для разделки мяса применяются роботы Fanuc M-710iB и Kuka KR 125. Для разгрузки поддонов в компании CraftBrew Alliance применяется робот Kuka KR 270 R2700 ultra. Для паллетирования в компаниях Sunoko и ArlaFoods AB используются роботы Kuka, в компании Chelsea Milling – роботы Fanuc M-710iC, M-2iAs и M-410, в компаниях Bremnes Seashore, Westheimer и Dugnaden – роботы Kawasaki, в компании KSGPM – роботы Comau, в компаниях Unilever, «МолПродукт» и «Хладокомбинат Западный» (Россия) – роботы ABB [54, 55]. Для упаковки продукции в компаниях Coca-Cola и KN deJong используются роботы Fanuc [56], в компаниях Maryland и Piper-Heidsieck und Charles Heidsieck – роботы Kuka, на заводе Danone – роботы Stäubli.

ХИМИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Промышленные роботы с успехом применяются в химическом производстве, выполняя свои задачи в условиях повышенной опасности, чему способствует высокая надежность механизмов и систем управления. Использование полностью автоматизированных роботизированных производственных линий позволяет повысить уровень контроля производства и исключить возникновение аварийных или опасных ситуаций. Применение

роботов позволяет снизить затраты предприятия на оплату труда, повысить производительность линий, повысить качество выпускаемой продукции.

В химической промышленности роботы используются, например, в рабочих камерах, удаленных или закрытых от доступа человека при обращении с радиоактивными или опасными материалами. Роботы SCARA используются для борьбы с биологическими опасностями, такими как вирусы или другие патогенные микроорганизмы. Роботы также используются при работе с неопасными материалами, которые могут производить потенциально взрывоопасную пыль; проверяют конструкции или здания, которые содержат опасные или радиоактивные материалы, структурную целостность реактора или здания, в котором хранится радиоактивный материал. Также роботы применяются для сбора образцов для анализа почв, загрязненных опасными химическими или радиоактивными веществами. Взрывозащищенные роботы применяются для работы в опасных зонах, где пары могут легко воспламениться при воздействии тепла или искр. Например, покрасочный робот Motoman (рассчитанный на опасные среды) с грузоподъемностью 10 кг используется для обработки деталей рулевого колеса автомобиля в зоне, где присутствуют легковоспламеняющиеся/взрывоопасные пары [57, 58].

Плотность роботизации в химической промышленности наиболее высока в Японии и Германии, см. табл. 10. Следует обратить внимание, что в Китае за три года плотность роботизации в химической промышленности увеличилась в 2 раза.

Таблица 10

Плотность роботизации в химической промышленности по странам, ед.

Страна	2008	2011	2011/2008
Южная Корея	20	25	1,25
Япония	165	150	0,91
Германия	100	105	1,05
США	50	65	1,30
Китай	10	20	2,0

Источник: авторская разработка по данным [48].

Примеры использования роботов в химической промышленности.

Промышленные роботы в химической промышленности используются для автоматизации следующих процессов:

- гидроабразивная резка пластиковых деталей;
- загрузка/разгрузка машин для литья под давлением;
- литье пластмасс под давлением;
- паллетирование продукции (позиционирование коробки, ее наполнение и герметизация, укладка коробок на поддоны);
- погрузка/разгрузка;
- подбор и перемещение деталей;
- производство углепластика;
- резка и обработка (например, пластмассовых топливных баков);
- сборка;
- упаковка;

- сортировка/отбраковка (сырья, полуфабрикатов, готовой продукции);
- маркировка/нанесение этикеток;
- загрузка производственных линий;
- фрезеровка;
- сварка (трением, лазерная).

В химической промышленности используются роботы компаний ABB, Kuka, Yaskawa Motoman и др. Например, для гидроабразивной резки пластиковых деталей в компании Volar Plastics используются роботы ABB. Для загрузки и разгрузки машин для литья под давлением в компании Krumpholz применяются роботы Kuka. Для литья пластмасс под давлением в компании Gebrüder Schwarz используются роботы Kuka, в компании Axjo – роботы ABB [59]. Для производства углепластика в компании Compositence используются роботы Kuka. Для резки и обработки деталей в компании TI Automotive применяются роботы ABB. Для упаковки в компаниях Power Plastics и Berry Plastics Corp применяются роботы ABB и Yaskawa Motoman. Для фрезеровки в компании Studio Babelsberg используются роботы Kuka. Для сборки в компаниях George Utz и Kabeldon используются роботы ABB. Для подбора и перемещения деталей в компании Fiskars применяются роботы ABB.

АЭРОКОСМИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

В аэрокосмической отрасли роботы используются в производстве самолетов и авиационных двигателей. Производство в аэрокосмической отрасли предъявляет очень высокие требования к точности при жестких допусках и высокой повторяемости процессов. При этом большой размер некоторых компонентов представляет собой проблему для стандартного промышленного робота, поэтому для создания крупных самолетов используется одновременно несколько роботов.

Промышленные роботы используются также для осмотра самолетов с целью их обслуживания. Роботизированные проверки самолетов помогают сократить время, затрачиваемое на это, в десятки раз – до нескольких минут. Роботы с дистанционным управлением отправляют изображения с высоким разрешением после осмотра поверхности самолета наземным службам для оценки необходимости проведения ремонта. Предполагается, что такие роботы могут быть в будущем модернизированы для проведения ультразвуковых и термографических проверок [60].

Примеры использования роботов в аэрокосмической промышленности.

Промышленные роботы в аэрокосмической промышленности используются для автоматизации следующих процессов:

- сверление отверстий в компонентах (одна из главных операций, в которых используются ПР в аэрокосмической промышленности; роботы, оснащенные системами видения, определяют, где нужно выполнять сверление на планере, и могут многократно повторять процесс сверления с одинаковой точностью);
 - нанесение герметика;
 - поиск изъянов в сварных швах;
 - подбор и размещение деталей (определение положения детали, ее захват и размещение);

- полировка;
- сварка;
- сборка фюзеляжа;
- покраска (крыльев, фюзеляжа, хвостовых секций, носовой части, дверей; в том числе против коррозии);
- распыление растворителя;
- тестирование материалов и деталей;
- предполетные проверки (приборных панелей в кабине, переключателей и других элементов сенсорной панели; роботы ищут трещины или расслоение композитов и обеспечивают целостность заклепок);
- контроль качества;
- изготовление и крепление деталей;
- обработка материалов;
- резка;
- чистка поверхности;
- погрузочно-разгрузочные работы.

В аэрокосмической промышленности используются роботы компаний Kawasaki, Fanuc, Kuka, Denso, ABB, Yaskawa Motoman и др.

Например, для нанесения герметика и поиска изъянов в сварных швах в компаниях Boeing и Airbus задействованы роботы Fanuc и Kawasaki. Для полировки, сварки и сборки фюзеляжа в компании Boeing применяются роботы Kuka. Для покраски и распыления растворителя в компаниях Airbus и Boeing применяются роботы Fanuc. Для сверления отверстий в компонентах на заводах Lockheed Martin применяются роботы Kuka. Для определения положения детали, ее захвата, сверления отверстий и манипулирования в компании Airbus используется робот Kawasaki RS080N. Для тестирования материалов и деталей в компаниях Airbus и Solvay применяются роботы Denso и ABB. Роботы Yaskawa Motoman просверливают отверстия в титановых и алюминиевых конструкциях, которые поддерживают композитные кожухи для носовой части лайнера Boeing 787. Для обшивки фюзеляжа Airbus A30X и частей фюзеляжа самолетов CSeries Bombardier в компании Coriolis Composites применяются роботы Kuka [61]. Для очистки заклепок от материала уплотнений на заводе Airbus Broughton используются роботы Yaskawa Motoman. Для погрузочно-разгрузочных работ, покраски, нанесения тефлонового покрытия (и грунтовочного покрытия) на конструкции, чтобы защитить их в течение срока службы самолета, применяется робот Kawasaki KJ314. Для нанесения износостойких покрытий на конструктивные элементы самолета, которые окружают или поддерживают двигательные установки, такие как гондолы и пилоны двигателя, в компании Spirit Aero Systems используются роботы Fanuc. Для сверления, нанесения покрытий и удаления краски, сварки алюминиевых конструкций и полировки, а также для герметизации аэроструктур, таких как лонжероны, основные несущие опоры для крыльев самолетов, используются роботы Fanuc. Например, для герметизации используются роботы серии M-710iC. Роботы могут использоваться для автоматизированного размещения волокон композитных фюзеляжей; помогают устранить ошибки, возникающие при разрезании и размещении волокна.

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ РОБОТОТЕХНИКИ В РОССИИ

В России, в отличие от развитых и ряда развивающихся стран, производство промышленных роботов отсутствует в масштабах, необходимых для реиндустриализации экономики. По данным НАУРР, производство промышленных роботов российских компаний – это, в основном, изготовление штучных экземпляров под заказ.

Объем продаж ПР в России также значительно меньше, чем во многих странах, как развитых, так и развивающихся. Так, в 2019 г. в России было продано 1410 промышленных роботов (на 403 больше, чем в 2018 г.), что примерно в 2 раза меньше, чем в Чехии (рис. 3). Снижение количества проданных роботов в 2016 г. в России связано с падением спроса на продукцию автопрома, который является основным потребителем промышленных роботов в России (около 40% всех продаж ПР).

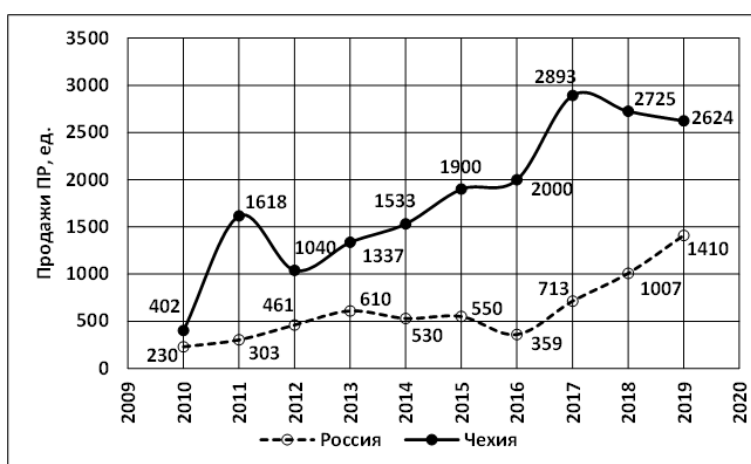


Рис. 3. Динамика продаж промышленных роботов в России и Чехии, ед.

Источник: авторская разработка по данным [4].

Всего в 2019 г. в эксплуатации находилось 6185 роботов, плотность роботизации составляла только 6 роботов на 10 тыс. занятых (примерно в 20 раз меньше среднемирового показателя), значительна зависимость от импортного оборудования и компонентов. Для сравнения, по данным IFR объем мирового рынка промышленных роботов в 2018 г. составил 16,5 млрд долл., в 2019 г. во всем мире было установлено почти 3 млн промышленных роботов. В Германии в 2019 г. было установлено более 22300 роботов; в 2018 г. в Польше было установлено 2642 ед., Чехии – 2624 ед., Венгрии – 926 ед., Словакии – 636 ед., Румынии – 553 ед. [62, 63].

Ситуация с применением ПР в России объясняется, очевидно, деиндустриализацией экономики: доля промышленности в целом в ВВП снизилась с 35,4% в 1990 г. до 23,6% в 2016 г., а в выпуске – с 48,6 до 37,7% соответственно; доля обрабатывающей промышленности (ОП) в валовой добавленной стоимости (ВДС) (%) в 2016 г. составляла 13,7% (в Южной Корее – 29,3%, Китае – 27,5%, Чехии – 27,1%), и Россия находилась по этому показателю на 29-м месте среди 40-ка стран. По производству электронной техники Россия среди 53-х стран в 2012 г. занимала 30-е место, и т.д. Очевидно, в этих условиях для роста парка

ПР предварительно требуется восстановление и дальнейшее развитие обрабатывающей промышленности – основного потребителя ПР [64].

Наиболее роботизированными отраслями в России являются автомобильная промышленность (так, на заводе «КАМАЗ» роботизация началась ещё в 1980 г.), химические и нефтехимические производства [65]. Примером предприятия, использующего промышленных роботов в России, является также Тихвинский вагоностроительный завод, где роботы применяются для выполнения сварочных работ, покраски, чистки кузовов перед покраской вагонов (на заводе установлено более 80 промышленных роботов) [66].

Далее рассмотрим некоторых производителей ПР в России (на основе информации, представленной в открытых источниках [67–69]), поскольку эти данные в определенной степени дают представление о состоянии дел в стране.

Компания «Аркодим» (Казань) поставляет роботов-манипуляторов на производства в Москве, Ростове-на-Дону, Рязани, Новосибирске (робот-сварщик, упаковщик, работник конвейера). Первый экспериментальный образец робота-манипулятора выпущен в 2015 г., а с 2016 г. компания поставляет промышленных роботов заказчикам. Роботов производят в Казани и Новосибирске, стоимость базовой комплектации – от 900 тыс. руб. В 2018 г. совместно с университетом «Иннополис» компания создала первый в России коллаборативный робот.

Компания «АвангардПЛАСТ» (Новосибирск), партнер компании «АРКОДИМ», производит роботы-манипуляторы под собственным брендом GRINIK. Осуществляет разработку, производство и внедрение промышленных роботов, производит роботы-манипуляторы для обслуживания термопластавтоматов.

EidosRobotics («Эйдос-Робототехника», Казань) – резидент Инновационного центра «Сколково» и участник Камского инновационного территориально-производственного кластера Республики Татарстан. Компания основана в 2012 г. и ориентирована на разработки в области компьютерного зрения, адаптивного управления роботами и коллаборативной робототехники. Выпускает манипуляторы серии Нехарод, имеющие шесть степеней свободы (они могут применяться для решения широкого класса задач). В 2018 г., совместно с «Газпром нефть», компания представила роботизированную руку-манипулятор для автоматизированной заправки транспортных средств, в том числе самолетов и бензовозов.

Компания «Битроботикс» (Москва) в 2014 г. создала первого российского дельта-робота для использования в производстве товаров повседневного спроса. В 2019 г. четыре таких робота использовались на хлебозаводах «Простор» и «Черёмушки» в Москве, серийное производство на территории технопарка планировалось запустить в марте 2020 г. Компания разрабатывает проекты роботов для кондитерской, молочной и мясоперерабатывающей промышленности, бытовой химии, парфюмерии и косметики; разрабатывает программное обеспечение, проектирует и производит роботов, конвейерные системы, рамы (при этом закупается общепромышленная автоматика: тачпады, пневматика, двигатели и периферия). В июле 2019 г. «Битроботикс» стала резидентом особой экономической зоны «Технополис Москва», а весной 2020 г. планировала запустить там серийное производство промышленных роботов.

Компания AripixRobotics с 2017 г. выпускает шестиосевой робот-манипулятор Aripix A1 (стоимость – 2 млн руб.). В ноябре 2018 г. привлекла 500 тыс. долл. инвестиций

и стала резидентом технопарка «Мосгормаш»; получила более 40 предзаказов от заводов AhmadTea, «Москабель», «Иннотех», Волжского шинного завода. В 2019 г. производила три робота в месяц, а к началу 2020 г. планировала производить до 15 роботов в месяц. Робот Agirix A1 устанавливается на производствах компаний «Москабельмет» и ГК «ПИК», его грузоподъемность – 10 кг, он оснащен компьютерным зрением и может работать на конвейере, упаковывать и маркировать товар, выполнять сварочные операции.

Компания «Рекорд-Инжиниринг» (основана в 2005 г.) производит роботы-манипуляторы для тяжелых изделий (грузоподъемность роботов – до 250 кг в зависимости от типа). За 14 лет компания разработала и выпустила более 200 промышленных роботов и в последние три года установила роботов на заводах компаний «Сургутнефтепромхим», «Мехатроника», «Кировская керамика», «Мультифлекс».

Компания «НПО «Андроидная техника», основанная в 2009 г., за 10 лет разработала более 50 робототехнических систем (например, известный робот Федор). В 2019 г. начала серийный выпуск роботов CR, которые могут перемещать грузы от 3 до 10 кг в рабочей зоне 1,8 м².

Робототехническая лаборатория Сбербанка разработала робот-манипулятор (который был представлен на международной выставке «Сколково Роботикс» в апреле 2019 г.) для сортировки предметов в магазинах, на почте и в банках. «Сбербанк» предполагает использовать робота для пересчета и сортировки монет и купюр и т.п.

Ростех и компания RozumRobotics (Беларусь) представили на международной промышленной выставке «Иннопром-2019» совместную разработку – высокоточный манипулятор «робот-рука» Pulse (две модели, грузоподъемностью 6 и 4 кг) для работ, предъявляющих высокие требования к точности и качеству (сварка, резка, пайка, сборка, проведение лабораторных анализов, испытаний, использование в ритейле и т.п.).

Разработка и производство роботов в России, по мнению экспертов, осложнены длительными сроками проведения НИОКР и испытаний, отсутствием элементной базы (сервомоторы, редукторы, системы линейного перемещения, контроллеры и др. импортируются), потребностью в соответствующей инфраструктуре для интеграции робота в производственный цикл (быстронастраиваемое ПО, шаблоны, машинное зрение и т.д.), короткими горизонтами планирования и высокой стоимостью проектов роботизации при низкой стоимости ручного труда, что приводит к большим срокам окупаемости.

Однако основная причина – значительная деиндустриализация, сокращение и разрушение обрабатывающих производств. Так, производство машин и оборудования в 2016 г. составило только 54,1%, а в целом объем продукции обрабатывающей промышленности составляет всего 104,9% относительно 1992 г.; особенно серьезно положение в станкостроении – если в 1990 г. в России, по данным Росстата, выпускалось 74,2 тыс. металлорежущих станков, в том числе с ЧПУ – 16,7 тыс., то в 2011 г. – 3,2 тыс. и 0,2 тыс. соответственно, а в 2017 г. было выпущено только 4368 металлорежущих станков [70].

В то же время страны, где высока доля обрабатывающей промышленности в ВВП и растет производство машин и оборудования, отличаются высокой скоростью роботизации. Так, например, в Южной Корее в 2016 г. доля обрабатывающей промышленности в ВВП составляла 26,8%, в Китае – почти 29%, в Чехии – 24,1%; доля производства машин и оборудования в обрабатывающей промышленности в период 1992–2016 гг. наиболее

существенно выросла в Венгрии (с 11,8 до 43,7%) и в Южной Корее (с 29 до 48,7%). За этот же период времени плотность роботизации в обрабатывающей промышленности Венгрии выросла с 2 до 57 ед., в Южной Корее – с 15 до 631 ед. Доля производства машин и оборудования в обрабатывающей промышленности Сингапура в 2016 г. составляла более 50%, и по плотности роботизации эта страна в 2018 г. вышла на первое место (831 робот на 10 тыс. занятых). Таким образом, для повышения плотности роботизации в России основное внимание необходимо уделить развитию обрабатывающей промышленности в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показывает, что применение промышленных роботов, которые обеспечивают снижение требований к интенсивному человеческому труду, травматизма на рабочем месте, времени безотказной работы, производственных затрат и одновременно повышение качества конечного продукта, производительности, гибкости и безопасности, скорости и точности выполнения заказов, значительно расширяется во многих странах, как развитых, так и развивающихся.

Основными тенденциями развития промышленных роботов являются внедрение машинного зрения, искусственного интеллекта, создание коллаборативных роботов (которые могут работать совместно с человеком), повышение простоты их использования, развертывания и обслуживания. Роботы становятся более универсальными, гибкими, точными. При их разработке используется открытый программный код, цифровые технологии управления.

Применение промышленных роботов постоянно расширяется: если ранее основным потребителем промышленных роботов было автомобилестроение, то в настоящее время происходит рост их применения в пищевой, фармацевтической и электротехнической/электронной и других отраслях обрабатывающей промышленности, что свидетельствует о новых тенденциях развития и применения робототехники.

При этом происходит снижение их стоимости (если в 2009 г. средняя цена робота составляла 63 тыс. долл., то в 2018 г. она снизилась до 45 тыс. долл. [71]), расширение возможностей и областей применения. Кроме того, растет спрос на простых в использовании роботов с ограниченным применением, коротким жизненным циклом и низкой ценой.

В этой связи для России особенно актуально ускорение процесса реиндустриализации, в первую очередь, восстановление и дальнейшее развитие машиностроения, электронной, электротехнической и других отраслей обрабатывающей промышленности, определяющих основной спрос на ПР. Должна быть разработана и реализована соответствующая программа приоритетного развития именно этих отраслей. Необходимо понимать, что только на этой базе в нашей стране возможно широкое применение промышленных роботов, развитие промышленного интернета вещей (IIoT) и, в целом, осуществление цифровизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. How manufacturing robots are changing the world in 2018. URL: <https://blog.technavio.com/blog/manufacturing-robots-changing-world> (дата обращения: 29.08.2022).

2. Carbonero F., Ernst E., Weber E. Robots worldwide: The impact of automation on employment and trade. ILO Research Department Working Paper № 36. October 2018. DOI: 10.13140/RG.2.2.10507.13603. URL: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/222392/1/1692599488.pdf> (дата обращения: 11.08.2022).
3. Theresa Knell. Polish industry needs automation. Spotlightmetal. 2019. URL: <https://www.spotlightmetal.com/polish-industry-needs-automation-a-815667/> (дата обращения: 04.09.2022).
4. Ciszak O. Industry 4.0 – industrial robots. In: MMS 2018: 3rd EAI International Conference on Management of Manufacturing Systems. 2018. P. 1–9. DOI: 10.4108/eai.6-11-2018.2279577. URL: <https://eudl.eu/pdf/10.4108/eai.6-11-2018.2279577> (дата обращения: 03.08.2022).
5. Karabegović I., Husak E. The Fourth Industrial Revolution and the Role of Industrial Robots: A with Focus on China // Journal of Engineering and Architecture. 2018. Vol. 6. № 1. P. 67–75. DOI: <http://dx.doi.org/10.15640/jea.v6n1a7>. URL: http://jea-net.com/journals/jea/Vol_6_No_1_June_2018/7.pdf (дата обращения: 02.09.2022).
6. Варшавский А.Е. Проблемы развития прогрессивных технологий: робототехника // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2017. Т. 8. № 4. С. 682–697.
7. International Federation of Robotics (IFR). URL: <https://ifr.org/> (дата обращения: 05.09.2022).
8. Graetz G., Michaels G. Robots at Work // The Review of Economics and Statistics. 2018. Volume 100. Issue 5. P. 753–768. DOI: https://doi.org/10.1162/rest_a_00754.
9. Sulavik C., Portnoy M., Waller T. How a new generation of robots is transforming manufacturing. Manufacturing Institute USA, 2014. P. 1–13.
10. Bottone G. A tax on robots? Some food for thought. DF Working Papers, 2018. №. 3. URL: http://www.finanze.it/export/sites/finanze/it/.content/Documenti/Varie/dfwp3_2018.pdf (дата обращения: 12.05.2020).
11. Robotics: Macroeconomic Trends. URL: <https://www.packaging-gateway.com/comment/robotics-macroeconomic-trends/> (дата обращения 10.01.2022).
12. UK robot density rises by 77% in 5 years, as the world doubles. URL: https://drivesncontrols.com/news/fullstory.php/aid/6914/UK_robot_density_rises_by_77_25_in_5_years,_as_the_world_doubles.html (дата обращения: 19.12.2021).
13. Kulkarni A.A., Dhanush P., Chetan B.S., Gowda T., Shrivastava P.K. Recent Development of Automation in Vehicle Manufacturing Industries // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019. Volume 8. Issue 6S4. P. 410–413. DOI: 10.35940/ijitee.F1083.0486S419. URL: <https://www.ijitee.org/wp-content/uploads/papers/v8i6s4/F10830486S419.pdf> (дата обращения: 01.09.2022).
14. Мазур А.А., Маковецкая О.К., Пустовойт С.В. Автоматизация и роботизация в сварочном производстве: состояние и тенденции развития. URL: <http://www.uniprofit.ru/spravka/article/avtomatizaciya-robotizaciya/> (дата обращения: 12.08.2022).
15. Дубинина М.Г. Анализ показателей развития роботов для дуговой сварки (по поколениям) // Анализ и моделирование экономических и социальных процессов: Математика. Компьютер. Образование. 2018. Т. 25. № 6. С. 88–96. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36542410>.
16. IFR. US-industry: 135000 new robots bring jobs back home. URL: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/us-industry-135000-new-robots-bring-jobs-back-home> (дата обращения: 10.07.2020).
17. Роботизация в России. URL: <https://politsturm.com/robotizaciya-v-rossii/#2018>; Промышленные роботы. URL: <http://dialog-e.ru/market-news/766/>; Скрынникова А. Больше всего роботов в России покупает автопром. Ведомости. URL: <https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2019/09/19/811579-bolshe-vsego-robot> (дата обращения: 18.01.2022).
18. Бизнес-журнал. 2015. №8(232), URL: https://books.google.ru/books?id=wKhJCgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (дата обращения: 05.09.2022).
19. Mathia K. Robotics for electronics manufacturing. Cambridge University Press, 2010. 238 p.
20. Wilson M. Implementation of robot systems: an introduction to robotics, automation, and successful systems integration in manufacturing. Butterworth-Heinemann, 2014. 242 p.
21. В январе-августе в Китае выросли инвестиции в высокотехнологичное производство. URL: http://russian.china.org.cn/china/txt/2019-09/29/content_75259269.htm (дата обращения: 01.09.2022).
22. Bank of Japan. Direct Investment by Region and Industry. URL: https://www.boj.or.jp/en/statistics/br/bop_06/index.htm/ (дата обращения: 01.09.2022).

23. Automation boom in electrical & electronics industry drives the sales of industrial robots. URL: <https://www.hafactory.it/2018/12/31/automation-boom-in-electrical-electronics-industry-drives-the-sales-of-industrial-robots/> (дата обращения: 11.08.2022).
24. Robot density unveils high potential in many countries – says IFR report for 2018. URL: <http://4smt.eu/automationrobotics/robot-density-unveils-high-potential-in-many-countries-says-ifr-report-for-2018/> (дата обращения: 27.08.2022).
25. Positive impact of industrial robots on employment. URL: https://robohub.org/wp-content/uploads/2013/04/Metra_Martech_Study_on_robots_2011.pdf (дата обращения: 27.08.2022).
26. Robotics in manufacturing: how robots play a role in the assembly line? URL: <https://robots.net/robotics/robotics-in-manufacturing/> (дата обращения: 04.09.2022).
27. Forbes. Роботы вместо людей. URL: <https://www.forbes.ru/tehnno-slideshow/tehnologii/71560-roboty-vmesto-lyudei?photo=4> (дата обращения 10.08.2022).
28. Assembling Technology – Assembly robots in Electronics Manufacturing. URL: <https://www.robots.com/articles/assembling-technology-assembly-robots-in-electronics-manufacturing> (дата обращения: 01.09.2022).
29. РТК по сборке и пайке для электронной промышленности. URL: <https://ds-robotics.ru/our-projects/rtk-po-sborke-i-pajke-dlya-elektronnoj-promyshlennosti> (дата обращения: 18.08.2022).
30. ABB. Small robots are the new big change. The Rapoo Case with IRB 120. URL: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106103A3555&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> (дата обращения: 19.08.2022).
31. Селективная пайка деталей с использованием робота Kuka KR agilus. URL: <https://www.kuka.com/ru-ru/отрасли/база-данных-решений/2016/07/solution-robotics-alnea> (дата обращения: 18.08.2022).
32. Karabegovic E., Karabegovic I., Hadzalic E. Industrial Robot Application Trend in World's Metal Industry // Engineering Economics. 2012. Vol. 23. №. 4. P.368–378. DOI: 10.5755/j01.ee.23.4.2567.
33. Жилина И.Ю. Мировой рынок робототехники: состояние и перспективы. 2020. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mirovoy-rynok-robototekniki-sostoyanie-i-perspektivy> (дата обращения: 06.09.2022).
34. Ben-Ari M., Mondada F. Elements of robotics. Springer Nature, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-62533-1. URL: <https://www.springer.com/gp/book/9783319625324> (дата обращения: 06.09.2022).
35. Markarian J. Using robotics in pharmaceutical manufacturing. PharmTech. 2014. URL: <http://www.pharmtech.com/using-robotics-pharmaceutical-manufacturing> (дата обращения: 08.08.2022).
36. Brumson B. Robotics in the pharmaceutical and life sciences industry. 2011. URL: https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/Robotics-in-the-Pharmaceutical-and-Life-Sciences-Industry/content_id/2867 (дата обращения: 04.04.2022).
37. Комкина Т.А. Особенности и перспективы развития медицинской робототехники // Концепции. 2015. № 1(33). С. 26–33. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34922926> (дата обращения: 04.09.2022).
38. RIA. Robotics Case studies. URL: https://www.robotics.org/content-detail.cfm/content_id/296 (дата обращения: 20.07.2021).
39. Robot investment reaches record 16.5 billion USD. URL: https://ifr.org/downloads/press2018/2019-09-18_Press_Release_IFR_World_Robotics_2019_Industrial_Robots_English.pdf (дата обращения: 09.08.2022).
40. Chrisandina N.J. Robotics in food manufacturing: benefits and challenges. URL: <https://www.prescouter.com/2018/08/robotics-food-manufacturing-benefits-challenges/> (дата обращения: 10.08.2022).
41. Продукты питания в стальных руках: к пятидесятилетию появления первых промышленных роботов. URL: <https://article.unipack.ru/38575> (дата обращения: 01.09.2022).
42. Bader F., Rahimifard S. A methodology for theselection of industrial robots in food handling //Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2020. Volume 64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102379>.
43. Robotics in Food Manufacturing and Food Processing. URL: <https://www.robotics.org/blog-article.cfm/Robotics-in-Food-Manufacturing-and-Food-Processing/154> (дата обращения: 15.10.2021).
44. Nayik G.A., Muzaffar K, Gull A. Robotics and food technology: a mini review // Journal of Nutrition & Food Sciences. 2015. Vol. 5. №. 4. DOI: 10.4172/2155-9600.1000384. URL:

- https://www.researchgate.net/publication/280831297_Robotics_and_Food_Technology_A_Mini_Review (дата обращения: 06.09.2022).
45. Caldwell D.G. (ed.). *Robotics and automation in the food industry: Current and future technologies*. Elsevier, 2012. 528 p. URL: <https://www.elsevier.com/books/robotics-and-automation-in-the-foodindustry/caldwell/978-1-84569-801-0> (дата обращения: 05.09.2022).
 46. Khan Z.H., Khalid A., Iqbal J. Towards realizing robotic potential in future intelligent food manufacturing systems // *Innovative food science & emerging technologies*. 2018. Vol. 48. P. 11–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.05.011>.
 47. Food and beverage processing sector. <https://www.ic.gc.ca/eic/site/026.nsf/eng/00121.html> (дата обращения: 07.08.2022).
 48. Бизнес-журнал. 2015. №8(232). URL: https://books.google.ru/books?id=wKhJCgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (дата обращения: 27.12.2021).
 49. Food tech: technology in the food industry. ING Economics Department. April 2019. URL: https://think.ing.com/uploads/reports/ING_-_Food_tech_-_April_2019.pdf (дата обращения 27.12.2021).
 50. Food companies using more robots in manufacturing. URL: <https://www.specialtyfood.com/news/article/food-companies-using-more-robots-manufacturing/> (дата обращения: 10.08.2022).
 51. Robotics and automation in the food industry and its future. URL: <https://www.laconveyors.co.uk/robotics-and-automation-in-the-food-industry/> (дата обращения: 10.08.2022).
 52. Data & Trends. EU food & drink industry. 2019. URL: https://www.fooddrinkeurope.eu/uploads/publications_documents/FoodDrinkEurope_-_Data__Trends_2019.pdf (дата обращения: 16.07.2020).
 53. Appendix III – trends in automation and robotics. *Automation and robotics in food and beverage*. URL: <https://www.ic.gc.ca/eic/site/026.nsf/eng/00131.html> (дата обращения: 06.09.2022).
 54. Цифровые роботизированные решения ABB на заводе Uniliver в России. URL: <http://www.robo geek.ru/robo-keisy/tsifrovye-robotizirovannye-resheniya-abb-na-zavode-unilever-v-rossii> (дата обращения: 02.09.2022).
 55. Connolly C. ABB high-speed picking robots establish themselves in food packaging // *Industrial Robot: An International Journal*. 2007 Vol. 34. № 4. P. 281–284. DOI: <https://doi.org/10.1108/01439910710749591>.
 56. Self-Catering: Robotics in the Food-Processing Industry. URL: <https://www.foodprocessing-technology.com/features/feature91016/> (дата обращения: 27.08.2022).
 57. Chemical and Hazardous Material Handling Robotics. URL: https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/Chemical-and-Hazardous-Material-Handling-Robotics/content_id/614 (дата обращения: 01.10.2020).
 58. Sadiku M.N.O., Musa S.M., Musa O.M. Robots in the Chemical Industry // *Invention Journal of Research Technology in Engineering & Management*. 2018. Volume 2. Issue 1. P. 21–23. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3267294>.
 59. Axjo. Case study: injection moulding. URL: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=PL0041&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch> (дата обращения: 19.08.2022).
 60. Impact of Robotics in the Aviation Industry. URL: <https://sastrarobotics.com/impact-of-robotics-in-the-aviation-industry/> (дата обращения: 01.09.2022).
 61. Bogue R. The growing use of robots by the aerospace industry // *Industrial Robot: An International Journal*. 2018. Vol. 45. № 6, P. 705–709. DOI: <https://doi.org/10.1108/IR-08-2018-0160>.
 62. Robotics adoption matters: how do we compare internationally, and does that need to change? URL: <https://www.aumanufacturing.com.au/robotics-adoption-matters-how-do-we-compare-internationally-and-does-that-need-to-change> (дата обращения: 27.12.2021); Robot Revolution Making Progress, but not yet Banging Down the Door. URL: <https://bbj.hu/business/tech/innovation/robot-revolution-making-progress-but-not-yet-banging-down-the-door> (дата обращения: 27.12.2021).
 63. Cséfalvay Z. Robotization in Central and Eastern Europe: catching up or dependence? // *European Planning Studies*. 2019. Volume 28. P. 1534–1553. DOI: 10.1080/09654313.2019.1694647.
 64. Варшавский А.Е. Основные проблемы реализации четвертой промышленной революции в России. Производство, наука и образование России: технологические революции и социально-экономические трансформации. Сборник материалов V международного конгресса (ПНО-V) Под общ. Ред. С.Д. Бодрунова. М.: ИНИР им. С.Ю. Витте, 2019, с. 95-105.

65. «Люди на заводах все еще боятся роботов». Что происходит на рынке промышленной роботизации в России. URL: <https://academy.sk.ru/news/b/press/archive/2020/03/24/lyudi-na-zavodah-vse-esche-boyatsya-robotov-chno-proishodit-na-rynke-promyshlennoy-robotizacii-v-rossii.aspx> (дата обращения: 22.07.2020).
66. Роботы Kuka в России: от автоматизации советского автопрома до гаражных манипуляторов. URL: <https://devsday.ru/news/details/22659> (дата обращения: 21.08.2022).
67. Цыплёнок М. Каких роботов производят в России для медицины, промышленности, грузоперевозок и образования. URL: <https://vc.ru/tech/80998-kakih-robotov-proizvodyat-v-rossii-dlya-mediciny-promyshlennosti-gruzoperevozok-i-obrazovaniya> (дата обращения: 30.08.2019).
68. Чистов Н. Производство промышленных роботов в России. URL: <https://robhunter.com/news/robototekhnika-v-rossiikto-segodnya-proizvodit-promishlennih-robotov> (дата обращения: 06.03.2020).
69. Обзор: Российский рынок промышленной робототехники 2019. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения: 26.02.2020).
70. Варшавский А.Е. Проблемы многоплановости задачи ускорения научно-технологического и инновационного развития России. Вестник ЦЭМИ РАН. 2018. Вып. 1. URL: <https://cemi.jes.su/s11111110000122-7-1>. DOI: 10.33276/S0000122-7-1.
71. Industrial robotic market outlook. URL: <https://www.asme.org/wwwasmeorg/media/resourcefiles/engineeringtopics/robotics/industrial-robotic-market-outlook-2019.pdf> (дата обращения: 07.08.2022).
72. JARA. Production and Shipments of Manipulators and Robots by Applications 2013-2017. URL: <http://www.jara.jp/e/> (дата обращения: 18.02.2022).
73. UNECE. URL: <https://w3.unecse.org/PXWeb/en> (дата обращения: 16.08.2022).
74. BARA (British Automation & Robot Association). URL: <https://www.ppma.co.uk/bara.html> (дата обращения: 05.09.2022).

ГЛАВА 3.

АНАЛИЗ ПЛОТНОСТИ РОБОТИЗАЦИИ В АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ВВЕДЕНИЕ

Промышленные роботы (ПР) помогают снизить потери сырья, оптимизировать эксплуатационные расходы и повысить производительность труда. Они улучшают качество и надежность продукции, обеспечивают лучшее использование производственных площадей, а также повышают безопасность на рабочем месте.

К достоинствам ПР относятся: доступность, предсказуемость, надежность, точность и непроницаемость для агрессивных сред. Однако они пока не обладают несколькими важными способностями, которые естественным образом проявляются у людей: способность реагировать на непредвиденные обстоятельства или изменяющуюся среду, а также способность повышать производительность на основе предыдущего опыта [1].

В связи с постоянным развитием технологий применение роботов значительно расширилось. Если раньше наибольшим спросом промышленные роботы пользовались в автомобильной и электронной промышленности, то в настоящее время они находят применение в медицине, пищевой, аэрокосмической и других отраслях [2]. Тем не менее, автомобильная промышленность является ведущим потребителем промышленных роботов. Она одной из первых внедрила робототехнику на своих производствах.

В работе проведен анализ факторов, влияющих на применение и распространение промышленных роботов в автомобильной промышленности, а также моделирование зависимости плотности роботизации в автомобильной промышленности от макроэкономических показателей. Глава подготовлена на основе статьи автора*.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РОБОТОВ В АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Плотность роботизации (количество роботов на 10 тыс. занятых) характеризует использование роботов в отраслях промышленности. В автомобильной промышленности наибольшая плотность роботизации.

В настоящее время роботы в автомобильной промышленности применяются в таких областях, как сварка (точечная и дуговая), покраска, нанесение клея и герметика и многих других [3, 4]. Они широко используются для окраски на автосборочных заводах, для нанесения покрытий (грунтовки, клея и др.). Например, роботы ABB IRB 5320 и IRB 5330 применяются для покраски на заводах компаний Fiat, BMW, Volvo, Honda, Great Wall Automobile, IRB 5400 – в компании Liaoyuan [5], IRB 580 – Euroform [6], роботы Kuka – на заводах Porsche и Mercedes Benz, Kawasaki – на заводе Toyota.

Именно автомобильная промышленность впервые начала использовать промышленные роботы в сварочных процессах. Примерно 20% всех ПР применяются для

* Дубинина В.В. Анализ плотности роботов в автомобильной промышленности // Анализ и моделирование экономических и социальных процессов / Математика. Компьютер. Образование: Сб. научн. трудов. Выпуск 27. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2020. С. 115–121. DOI: 10.20537/mce2020econ11.

выполнения сварочных операций. Например, роботы Fanuc используются для сварки на заводах компаний Hyundai, Nissan, а роботы Kuka – на заводах Ford, Porsche, Mercedes Benz, Skoda, Volkswagen.

Роботы, используемые для сборочных процессов, помогают сократить потери и уменьшить время ожидания и переключения; повысить точность, согласованность и скорость конвейера, заменить людей-операторов в утомительной работе на конвейере. Например, роботы используются для установки ветровых стекол и колес. На многих заводах по производству автомобильных деталей роботы собирают узлы меньшего размера, такие как насосы и двигатели.

Погрузочно-разгрузочные роботы используются для перемещения, упаковки и подбора продукции. Они также могут автоматизировать функции, связанные с переносом деталей с одного оборудования на другое. Прямые затраты на рабочую силу снижаются, а многие утомительные и опасные виды деятельности, традиционно выполняемые людьми, исключаются.

На заводе Audi для погрузочно-разгрузочных работ используется робот Fanuc M-900iA/350, а для проверки сварных швов – Fanuc CR-7iA/L. Для выполнения погрузочно-разгрузочных работ в компании Volkswagen Group (занимается производством стоп-сигналов) применяется робот Staubli SCARA TS60.

В 2005 г. 90% всех промышленных роботов приходилось на автомобильную промышленность, а в 2019 г. – 50%. Это связано с тем, что почти в каждой отрасли открываются инновационные способы внедрения роботов. Однако автомобильная промышленность продолжает доминировать в использовании роботов. Автоматизация необходима для безопасности, качества и производительности.

В 2005–2008 гг. ежегодные продажи роботов были примерно постоянными, в 2009 г. в результате экономического и промышленного кризиса продажи сократились до 19,3 тыс. ед. В 2012 г. в автомобильной отрасли продажи роботов росли в среднем на 6%. В 2015 г. они составляли 98 тыс. ед. (38.75% от общего применения ПР в мире), а в 2020 г. – 80 тыс. ед. (табл. 1).

Таблица 1

Ежегодные мировые продажи промышленных роботов для автомобильной промышленности, тыс. ед., 2011–2020 гг.

Показатель	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Автомобильная промышленность	59,7	63,2	69,4	94	98	103,3	125,7	116	105	80
Индекс роста продаж ПР, 2011 г. = 100%	100	106	116	157	164	173	211	194	176	134

Источник: [7].

Количество выпущенных автомобилей за 10 лет выросло с 66 млн ед. (2005 г.) до 90,9 млн ед. (2019 г.) [8]. С увеличением количества промышленных роботов в автомобильной промышленности в мире за десять лет производство автомобилей увеличилось на 40%. Автоматизация производственных процессов в автомобильной промышленности, таких как сварка корпуса, покраска, сборка и контроль качества, приводят к сокращению времени обработки и увеличению производства автомобилей [9].

С 2010 г. спрос на роботов значительно ускорился из-за тенденции к автоматизации производства. В 2017 г. в автомобильной отрасли продажи роботов выросли более чем в 2 раза по сравнению с 2011 г. Больше всего роботов в 2017 г. было продано в Китае – 138 тыс. ед. (в Южной Корее – 40 тыс. ед., в Японии – 38 тыс. ед.).

Автомобильная промышленность является самым главным потребителем роботов как с точки зрения абсолютного количества единиц роботов, так и с точки зрения числа роботов на одного работника. Уровень автоматизации в автомобильной промышленности намного выше, чем во всех других секторах экономики. Наибольшая плотность роботизации в 2018 г. была у Южной Кореи – 2589 роботов на 10 тыс. занятых. В России данный показатель составляет примерно 4 ед. (см. табл. 2).

Таблица 2

Плотность роботизации в автомобильной промышленности по странам

Страна	1997	2000	2006	2010	2015	2017	2018	2019
Южная Корея	...	...	...	1239	1218	2435	2589	...
США	426	587	830	1112	1218	1200	...	1287
Германия	625	820	1220	1130	1147	1162	1270	1311
Япония	1676	1686	1820	1436	1276	1158	...	1248
Франция	369	520	1160	...	940	1156	...	...
Испания	252	520	970	...	883	990	...	...
Китай	...	...	...	105	392	505	539	938
Италия	...	850	1630	1229	877	...	...	...
Швеция	470	540	590	...	734	...	...	...
Великобритания	299	430	600	600	606	...	...	...

Источник: [7].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПЛОТНОСТИ РОБОТИЗАЦИИ В АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ОТ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

В работе использовались данные IFR [7], World Bank [10], UNECE [11] за 2015 г. по 20 странам (США, Южная Корея, Китай, Япония и др.). Исследовалась зависимость плотности роботизации от таких показателей, как ВВП на душу населения по паритету покупательской способности (ППС), доля затрат на НИОКР в ВВП, доля занятых в промышленности в общем количестве занятых, доля добавленной стоимости обрабатывающей промышленности в ВВП и др. Наиболее высокий коэффициент корреляции был получен для зависимостей, представленных на рис. 1.

На основе проведенного анализа были разработаны многофакторные модели зависимости плотности роботизации от ВВП на душу населения по ППС, доли механизмов и транспортного оборудования в добавленной стоимости обрабатывающей промышленности, доли экспорта промышленных товаров в общем объеме товарного экспорта рассматриваемых стран. Увеличение ВВП на душу населения по ППС на 1000 долл. приводит к росту плотности роботизации на 16,8 ед. на 10 тыс. занятых в автомобильной промышленности:

$$Y = -125,65 + 11,77 X_1 + 0,0168 X_2, \quad R^2 = 0,67,$$

(-0,73)
(1,9)
(3,61)

где Y – плотность роботизации в автомобильной промышленности, ед. на 10 тыс. занятых в автомобильной промышленности; X_1 – механизмы и транспортное оборудование (% от добавленной стоимости в обрабатывающей промышленности); X_2 – ВВП на душу населения по ППС (постоянные цены 2011 г., долл.; в скобках здесь и далее указаны t -статистики);

$$Y = -376,81 + 8,12 X_3 + 0,02 X_2, \quad R^2 = 0,63,$$

$(-1,39)$
 $(2,28)$
 $(4,2)$

где X_3 – доля экспорта промышленных товаров в общем объеме товарного экспорта, %.

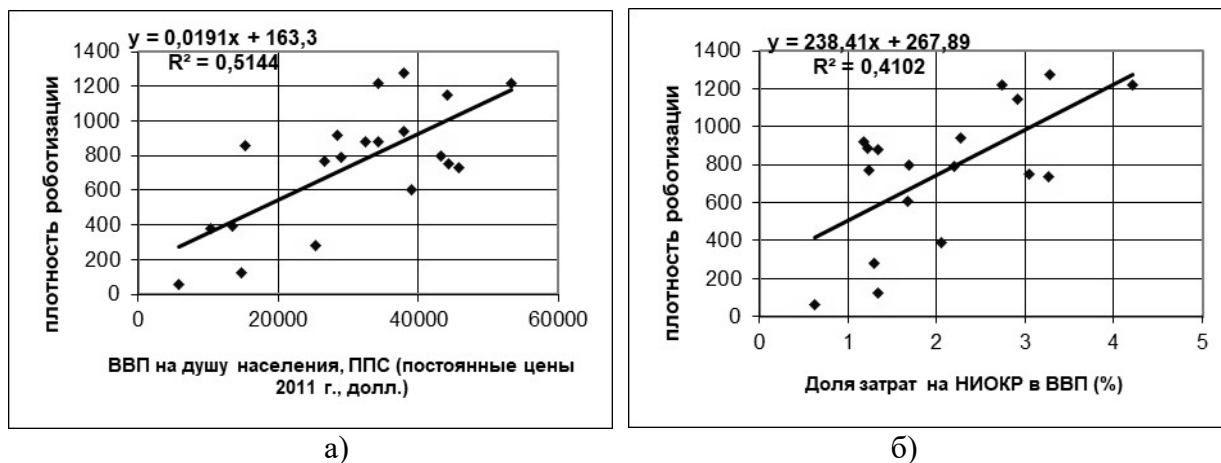


Рис. 1. Зависимость плотности роботизации от ВВП на душу населения по ППС (а), доли затрат на НИОКР в ВВП (б)

Источник: авторская разработка по данным [7, 10, 11].

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ РОБОТИЗАЦИИ НА ВЫПУСК АВТОМОБИЛЕЙ

Далее были построены модели, оценивающие влияние плотности роботизации на производство легковых автомобилей в США, Германии и Японии с 2002 по 2017 г. В модели была введена фиктивная переменная, равная 1 в 2008 г. для Германии и в 2016 г. для Японии, и 0 в остальные годы.

$$Y = a \cdot x + b \cdot dum + c, \quad (1)$$

где Y – производство легковых автомобилей, млн. шт., x – плотность роботизации, dum – фиктивная переменная, равная 1 в 2008 г. для Германии и в 2016 г. для Японии, и 0 в остальные годы.

Полученные для разных стран оценки параметров модели представлены в табл. 3.

Таблица 3

Оценка параметров модели (1)

Страна	a	b	c	R^2
США	0,025 (3,2)	...	-19,0 (2,1)	0,59
Япония	0,003 (2,7)	6,2 (5,5)	4,7 (2,5)	0,74
Германия	0,014 (3,2)	1,1 (3,1)	-10,1 (-2,1)	0,63

Источник: авторская разработка по данным [7, 10, 11].

Для всех стран получена положительная корреляция между плотностью роботов и количеством произведенных автомобилей за год. Рост плотности роботизации в большей степени влияет на количество произведенных легковых автомобилей в США по сравнению с Германией и Японией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования выявлено положительное влияние роста ВВП на душу населения по ППС, доли затрат на НИОКР в ВВП, доли механизмов и транспортного оборудования в добавленной стоимости обрабатывающей промышленности на плотность роботизации, а также положительное влияние плотности роботизации в автомобильной промышленности на производство легковых автомобилей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варшавский А.Е. Проблемы развития прогрессивных технологий: робототехника // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2017. Т. 8. № 4с. С. 682–697.
2. Комкина Т.А., Яркин А.П. Особенности использования бионики в медицинской робототехнике // Научно-практический журнал «Концепции». № 1 (37). 2018. С. 45–52.
3. Дубинина М.Г. Анализ показателей развития роботов для дуговой сварки (по поколениям) // Анализ и моделирование экономических и социальных процессов / Математика. Компьютер. Образование: Сб. научн. трудов (выпуск 25). № 2. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2018. С. 88–96.
4. Варшавский А.Е., Дубинина В.В. Основные тенденции изменения технико-экономических показателей промышленных роботов // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2018. Т. 14. № 10. С. 1916–1935. DOI: 10.24891/ni.14.10.1916.
5. Ежеленко В. Промышленная робототехника в России. Краткий обзор роботизации, проблем и перспектив внедрения промышленных роботов на отечественных предприятиях. URL: http://www.umpro.ru/templates/art_print.php?art_id_1=395 (дата обращения: 27.12.2021).
6. Karabegović I., Husak E. The Fourth Industrial Revolution and the Role of Industrial Robots: A with Focus on China // Journal of Engineering and Architecture. 2018. Vol. 6, No. 1. P. 110-117. DOI: 10.15640/jea.v5n2a9.
7. IFR (International Federation of Robotics). URL: <https://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/> (дата обращения: 05.09.2022).
8. Занимательная статистика автомира: сколько всего машин на планете и многое другое. URL: <https://autopeople.ru/article/podborki/6845538.html> (дата обращения 20.01.2022).
9. De Backer K., De Stefano T., Menon C., Ran Suh J. Industrial robotics and the global organization of production. OECD Science, Technology and Industry Working Papers. No. 2018/03.
10. World Bank. URL: <https://data.worldbank.org/> (дата обращения: 06.09.2022).
11. UNECE. URL: <https://w3.unece.org/PXWeb/en> (дата обращения: 06.09.2022).

ГЛАВА 4. СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ФАКТОРОВ РОБОТИЗАЦИИ В РОССИИ И ПОЛЬШЕ

ВВЕДЕНИЕ

Экономика России претерпела значительные изменения после распада Советского Союза и перехода к рыночной системе. Экономические реформы 1990-х гг., усугубленные процессами глобализации, привели к деиндустриализации, ориентации на экспорт сырьевых товаров, значительному снижению инновационной активности. Зависимость от экспорта сырьевых товаров делает Россию уязвимой перед циклами подъемов и спадов мировых цен на них. Так, сочетание падения цен на нефть, международных санкций и структурных ограничений привело к снижению ВВП России в 2015 г. на 2,8%. В настоящее время взят курс на импортозамещение и реиндустриализацию, подъем обрабатывающих производств, в первую очередь наукоемких.

Одним из показателей этого процесса является использование прогрессивных технологий, в частности, роботизация производства. Однако в России всего установлено около 8 тыс. промышленных роботов, что значительно меньше по сравнению с наиболее развитыми странами (например, в Германии установлено более 130 тыс. роботов). В 2019 г. плотность роботизации в Польше составляла 46 ед., а в России 6 ед. (в Польше такое значение показателя было в 2007 г.). Следует отметить, что в 2017 г. в России в структуре ВВП на долю промышленности приходилось 32,4%, а в Польше 40,2% [1]. В структуре польского импорта содержится большая доля инвестиционных товаров и сырья, а в экспорте – высокий процент готовой продукции и промышленных товаров. В российском экспорте преобладают природный газ, нефть, металлические руды и металлы [2].

Внедрение роботизации в производственные процессы повышает конкурентоспособность экономики, что особенно актуально для России в условиях санкций и взятого курса на реиндустриализацию экономики. В Польше основными стимулами использования робототехники являются повышение производительности и снижение затрат, сокращение сроков поставок, повышение качества продукции за счет устранения человеческих ошибок и усиления конкурентоспособности [3].

И Россия, и Польша перешли к рыночной системе примерно в одно и то же время. Поэтому представляет интерес то, что способствует значительному росту роботизации в Польше, какова там инвестиционная и промышленная политика. В данной статье проводится анализ динамики основных технико-экономических показателей и на основе моделирования определяются факторы, способствующие ускорению процессов роботизации. Глава подготовлена на основе статьи авторов*.

* Варшавский А.Е., Дубинина В.В. Сопоставительный анализ показателей и факторов роботизации в России и Польше // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2021. Т. 17. № 10. С. 1875–1902. <https://doi.org/10.24891/ni.17.10.1875>

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ РОСТА РОБОТИЗАЦИИ В ПОЛЬШЕ

Общие показатели экономического развития. Экономика Польши непрерывно развивалась с начала 1990-х гг. По данным World Bank, ВВП Польши за период 1990–2018 гг. вырос на 178,8%, а добавленная стоимость обрабатывающей промышленности – на 186% за период 2002–2016 гг. За период 1996–2015 гг. инвестиции в обрабатывающую промышленность выросли на 90,4%, в экономику – на 153,1% за тот же период (табл. 1).

Таблица 1

Индексы роста основных экономических показателей Польши

Год	ВВП*	Добавленная стоимость обрабатывающей промышленности*	Инвестиции в обрабатывающую промышленность**	Инвестиции в экономику**
1990	100	...	...	...
1995	111,4	...	...	...
1996	118,1	...	100	100
2000	143,9	...	127,5	146,2
2002	148,7	100	93,9	115,4
2005	167,5	133,1	129,0	136,7
2010	211,5	212,0	124,7	223,6
2015	245,5	273,7	190,4	253,1
2016	253,0	286,0	...	...
2017	265,2	...	...	...
2018	278,8	...	...	...

Источник: авторская разработка по данным * [74], ** [75].

Важным фактором роста экономики Польши является экспорт. Объем экспорта продукции в 1991–2018 гг. увеличился более чем в 17 раз – с 14,9 млрд до 264,786 млрд долл., импорт за тот же период вырос почти в 18 раз – с 15,5 млрд до 270,2 млрд долл. Доля промышленных товаров в экспорте возросла с 55,3% в 1991 г. до 80,2% в 2018 г. [4]. При этом в 2018 г. на долю экспорта продукции машиностроения приходилось 39,9%, продукции химической промышленности – 13,9% и продукции агропромышленного комплекса – 13,3% [5].

ДВА ЭТАПА РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ

Можно выделить два этапа развития экономики – до 2004 и после 2004 г., когда Польша была принята в ЕС.

Темпы роста ВВП в 1991–1995 гг. составляли 2,3%. С середины 1990-х гг. объем промышленного производства в Польше систематически увеличивался, однако на первом этапе это был медленный рост.

До 2004 г. прямые иностранные инвестиции (ПИИ) транснациональных корпораций были источником экономического роста Польши. Вступление страны в ЕС в 2004 г. придало дополнительный импульс польской экономике за счет средств из структурных фондов ЕС. Страна является крупнейшим получателем фондов развития ЕС, и их циклическое распределение может существенно повлиять на темпы экономического роста. В 2014–2017 гг. реальные темпы роста ВВП Польши превышали 3%.

После вступления в ЕС на территории Польши стали размещаться зарубежные производства крупных транснациональных корпораций (ТНК), в результате чего произошла модернизация обрабатывающей промышленности на основе импортных технологий [5]. Крупнейшими инвесторами были: концерн Fiat (Италия), который инвестировал 1,769 млрд долл. в производство автомобилей; компания Kronospan Holdings Ltd. (Кипр), вложившая более 1,062 млрд долл. в производство древесины и изделий из нее; General Motors Corporation (США) – 1,01 млрд долл. в производство автомобилей Opel; концерн Daewoo (Южная Корея) – 936 млн долл. в производство автомобилей, а также электрического и оптического оборудования [6].

В 2014–2020 гг. Польша из средств ЕС получила 82,5 млрд евро [7] для развития инфраструктуры и транспорта, сельского хозяйства; здравоохранения; увеличения рабочих мест; а также для других проектов Европейского социального фонда [8]. Основная часть ПИИ в 2019 г. была направлена в сферу производства – 42%, финансовых услуг – 22,7%, в автотранспорт и связь – 12,1% [9].

По данным World Bank [74], прямые иностранные инвестиции в Польшу составляли 3659 млн долл. в 1995 г., 9335 млн долл. – в 2000 г., 18 395 млн долл. – в 2010 г., 15 065 млн долл. – в 2015 г., 12 034 млн долл. – в 2018 г.

С 2005 по 2019 г. ВВП Польши вырос в 1,7 раза, а добавленная стоимость обрабатывающей промышленности и информационно-коммуникационных технологий – в 2,5 раза [10].

Наиболее успешным для Польши был период до экономического кризиса (2004–2008 гг.), который отмечался самыми высокими среднегодовыми темпами прироста ВВП, добавленной стоимости обрабатывающей промышленности, инвестиций в экономику и обрабатывающую промышленность (табл. 2). Интенсивное развитие промышленности связано во многом с вступлением страны в ЕС – открылись новые рынки, увеличились потоки иностранного капитала в страну.

Таблица 2

Среднегодовые темпы прироста основных экономических показателей Польши по периодам, %

Период	ВВП	Добавленная стоимость обрабатывающей промышленности	Инвестиции в экономику	Инвестиции в обрабатывающую промышленность	Эластичность инвестиций в экономику по ВВП
1991–1995	2,3	...	...	...	...
1996–2003	4,1	3,1	6,2	...	0,08
2004–2008	5,2	11,5	11,7	11,1	2,19
2009–2014	3	4,9	2,2	1,0	0,32
2015–2018	4,2	5,9*	6,1	...	1,6*

* 2015–2017 гг.

Источник: авторская разработка по данным [74, 75]

Во время экономического спада 2008–2009 гг. Польша была единственной страной ЕС, избежавшей рецессии. В 2008–2009 гг. мировой кризис замедлил экономическое развитие, но в последующие годы снова был отмечен рост [11]. В 2009 г. он составил 2,8% и после 2013 г. 3–5%, что вдвое превышает средний показатель по ЕС.

После снижения среднегодовых темпов прироста показателей экономического развития в 2009–2014 гг., произошел их рост в 2015–2018 гг. В настоящее время промышленность Польши развивается примерно такими же темпами, как и экономика в целом.

В 2019 г. доля промышленности в ВВП составляла 28,83%, сельского хозяйства – 2,15%, сектора услуг – 56,9%. Значительная доля приходится на основные экспортные отрасли – электронику и автомобилестроение: на долю автомобильной промышленности в 2015 г. приходилось 8% в общей ВДС, электронной – 4,9%, машин и транспортного оборудования – 3,6% [12].

В Польше хорошо развиты все отрасли машиностроения, их динамичное развитие является результатом наличия как внутреннего, так и внешнего рынков сбыта. В 2017 г. около 4,6% ВДС промышленности было создано в машиностроении [13]. Производимые машины и устройства используются в других отраслях, способствуя их развитию.

Численность занятых в обрабатывающей промышленности Польши сократилась на 20,8% за период 1995–2004 гг., а в период с 2007 по 2016 г. она выросла на 5,5%. При этом добавленная стоимость обрабатывающей промышленности за период 1995–2016 гг. выросла на 194% (табл. 3).

Таблица 3

Динамика показателей численности занятых, добавленной стоимости обрабатывающей промышленности и ее доли в ВВП Польши, %

Год	Численность занятых в обрабатывающей промышленности	Добавленная стоимость обрабатывающей промышленности	Доля добавленной стоимости обрабатывающей промышленности в ВВП
1995	100	100	...
2000	90,3	101,5	...
2002	76,6	102,8	100
2005	82,1	136,9	112,2
2010	85,9	217,9	108,3
2015	92,6	281,4	122,6
2016	97,3	294,0	125,7

Источник: авторская разработка по данным [75].

С тех пор как Польша стала членом Европейского союза, ее экспорт увеличился более чем на 30%. В 2019 г. экспорт товаров составлял 264 млрд долл., а импорт – 262 млрд долл. (в 2015 г. 198,2 млрд и 192,6 млрд, соответственно). Экспорт услуг вырос с 43,4 млрд в 2015 г. до 72 млрд долл. в 2019 г., а импорт услуг – с 32,5 млрд до 43,7 млрд долл. за тот же период [14].

Автомобильная промышленность. В 1978–2002 гг. Польша производила собственную марку легкового автомобиля Polonez, затем его производство прекратилось и с 2002 г. в Польше производятся автомобили других стран [15].

Самым крупным в Польше и одним из крупнейших автомобильных заводов в Европе является Fiat. Кроме того, на заводе General Motors Manufacturing Poland выпускаются модели Opel Astra и Opel Cascada; на заводе Volkswagen Poznań – автомобили VW Caddy и Caddy Maxi, а также VW Transporter; на заводе MAN Bus – городские и туристические автобусы.

Важно отметить, что на заводах в Польше производятся узлы и компоненты автомобилей: двигатели, системы охлаждения двигателей, стеклоочистители, системы освещения, автокресла, выхлопные и тормозные системы, подвески и амортизаторы; при этом производимые в стране шасси и каркасы автомобилей отправляются в Германию для окончательной сборки и др. Полностью в Польше собираются грузовики MAN, городские, междугородные и туристические автобусы, а также троллейбусы и трамваи компаний Solaris Bus & Coach S.A, Volvo, Scania.

Особенно следует выделить производство двигателей. В 2019 г. в стране насчитывалось шесть заводов по производству двигателей: Toyota (2 завода), Daimler, Volkswagen, FCA (Fiat-Chrysler Automobile), Peugeot-Citroën [16]. Например, Toyota Motor Manufacturing Poland производит двигатели и трансмиссии (механические и полуавтоматические, как для бензиновых, так и для дизельных двигателей) для своих автомобилей, Citroen и Peugeot. В 2018 г. в Польше было произведено 377 тыс. бензиновых двигателей, в 2019 г. – 700,9 тыс. В то же время снижается производство дизельных двигателей (782,4 тыс. ед. в 2019 г., что на 90 тыс. ед. меньше, чем в 2018 г.) [17]. В 2019 г. был открыт завод Fiat Chrysler Automobiles по производству нового поколения малолитражных двигателей, соответствующих стандарту выбросов Евро 6D [18]. На заводе Volkswagen в Познани производятся головки двигателя и корпуса рулевого механизма. Magna Cosma занимается штамповкой кузовных деталей автомобилей, производит узлы, компоненты и модули для кузовов, в том числе для Volkswagen, Audi и Opel.

Электронная промышленность. С начала 1990-х гг. развитие этой отрасли в Польше оказалось в сфере интересов многих иностранных концернов – Schneider Electric, Alcatel-Lucent, Philips. В настоящее время электронная промышленность – один из самых быстрорастущих сегментов экономики [19]. В 2017 г. производство электроники в Польше достигло 10,5 млрд долл. (рост на 16,5% по сравнению с 2016 г.). На долю ЖК-телевизоров приходилось 37% от общего объема производства в 2017 г., на долю компьютеров – 23,6%. В 2017 г. производство компьютерного оборудования увеличилось на 24,7%, производство персональных компьютеров увеличилось с 2,94 млн ед. в 2016 г. до 3,73 млн в 2017 г. [20].

РОБОТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

На первом этапе до 2004 г. показатели роботизации производства в Польше были низкими – плотность роботизации составляла 1–3 ед. Однако на втором этапе после 2004 г. плотность роботизации значительно возросла. Польша занимает 25 место в рейтинге Bloomberg Innovation Index 2020 (Россия – 26 место). После экономического кризиса темпы роста роботизации замедлились при сокращении инвестиций ЕС. Однако в 2018 г. использование роботов выросло на 40% по сравнению с 2017 г.

Количество ежегодно устанавливаемых промышленных роботов (ПР) в Польше за период 2009–2019 гг. выросло в 8 раз – с 322 до 2642 ед. (табл. 4). Около 6% малых и средних предприятий и 22% крупных компаний Польши использовали роботы (в странах ЕС – 7 и 25% соответственно).

Таблица 4

Количество ежегодно устанавливаемых промышленных роботов, ед.

Показатель	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Количество устанавливаемых ежегодно ПР, ед.	322	569	686	725	692	1267	1795	1632	1891	2651	2642

Источник: [68, 76].

На долю автомобильной промышленности в 2018 г. приходилось 883 робота (33% от общих продаж ПР), производства пластмасс и химических продуктов – 407 ед. (15%), металлургической промышленности и машиностроения – 227 ед. (9%) [21]. В 2019 г. на долю автомобильной промышленности приходилось 982 робота (37% в общем объеме продаж), производства пластмасс и химикатов – 386 ед. (15%), металлообработки и машиностроения – 252 ед., электротехнической/электронной промышленности – 192 ед. В секторе продуктов питания и напитков было установлено 135 новых роботов (рост на 111%) [22].

Парк роботов Польши составлял 493 ед. в 1995 г., 643 – в 2004, 5452 – в 2010, 8100 – в 2015, 15 800 ед. – в 2019 г.

Промышленные роботы используются в основном в обрабатывающей промышленности (81,5%), в том числе в автомобильной (38,6%), химической (18,9%) и металлургической промышленности (12,8%). В 2020 г. компания Amazon открыла новый объект в Польше, где работают 1 тыс. сотрудников и 4 тыс. роботов [23]. На предприятиях банковского, страхового и телекоммуникационного секторов Польши используется до 30–50 роботов, однако есть предприятия с более чем 100 роботами [24].

В 2014 г. самыми популярными задачами роботов в Польше являлись перемещение (48%) и сварка (27%) [25]. Всего для перемещения используется более 7 тыс. ед. (из которых 1400 ед. были проданы в 2018 г.), для сварки – около 500 ед. [26].

В 2018 г. больше всего роботов было закуплено для литья пластмасс – 460 ед., сварки – 440 ед., погрузочно-разгрузочных работ – 291 ед. Кроме того, для обслуживания станков в 2018 г. было продано 200 роботов, паллетирования – 187 ед., упаковки и перемещения – 172 ед., сборки – 98 ед., дозирования – 33 ед., обработки – 10 ед. [21]. В 2019 г. на долю операций по перемещению материалов и обслуживанию оборудования приходилось 59% ПР, сварочных операций – 15%, обработки – 3%, дозирования – 2% [27].

Плотность роботизации растет, хотя медленнее по сравнению с другими странами. В целом за период 1992–2019 гг. плотность роботизации в обрабатывающей промышленности выросла в 23 раза (с 2 ед. в 1992 г. до 46 ед. в 2019 г.) [28]. В 1992–2006 гг. данный показатель находился в диапазоне от 1 до 3 ед. на 10 тыс. занятых, однако с 2007 г. он начал увеличиваться и достиг 46 ед. в 2019 г. (рис. 1).

В 2014 г. в автомобильной промышленности Польши было установлено 563 новых робота (53% всех закупок роботов в Польше). Больше всего роботов было приобретено для процессов литья под давлением, транспортировки и погрузочно-разгрузочных работ, сварки, покраски и сборки. В 2019 г. автомобильная промышленность приобрела 982 робота (883 ед. в 2018 г.). В 2010 г. плотность роботизации в автомобильной промышленности Польши составляла 54 ед., в 2015 г. – 131 ед., в 2018 г. – 189 ед., в 2019 г. – 190 ед.

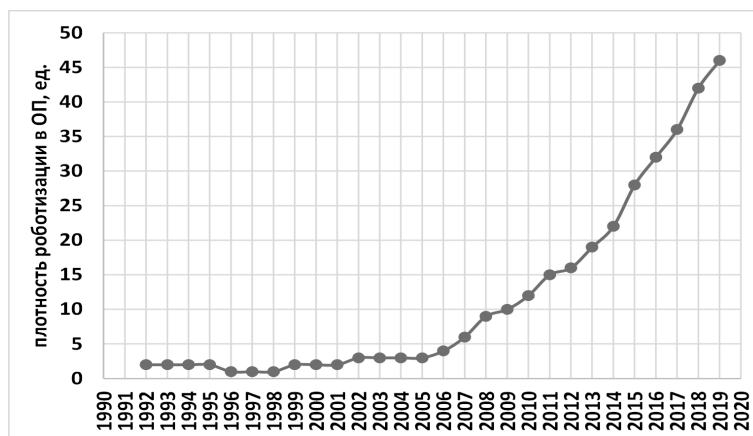


Рис. 1. Динамика плотности роботизации в обрабатывающей промышленности Польши

Источник: авторская разработка по данным [68].

В 2019 г. в Польше был построен завод AG Motors по роботизированному производству алюминиевых рам для велосипедов. Производственная мощность составляет 400 тыс. ед. в год. Инвестиции составили более 10 млн евро [29].

ЭКОНОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ПЛОТНОСТИ РОБОТИЗАЦИИ С ПОКАЗАТЕЛЯМИ ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ

За период 1995–2004 гг. добавленная стоимость обрабатывающей промышленности несколько выросла – на 30,7%, а плотность роботизации в обрабатывающей промышленности выросла с 2 до 3 ед.; численность занятых сократилась примерно на 20%. Затем в 2004–2015 гг. в Польше валовое накопление основного капитала выросло на 94,4%, добавленная стоимость промышленности – на 74,9%, добавленная стоимость производства автомобилей, прицепов и запчастей – на 25,6%. При этом плотность роботизации в обрабатывающей промышленности значительно увеличилась – на 19 ед. (табл. 5).

На основе данных для второго этапа были построены модели зависимости плотности роботизации в обрабатывающей промышленности от валового накопления основного капитала и добавленной стоимости производства автомобилей, прицепов и запчастей (модель 1, 2004–2015 гг.), а также добавленной стоимости промышленности и экспорта товаров и услуг (модель 2, 2007–2015 гг.). В моделях использовались значения плотности роботизации (ед.) и макроэкономических показателей (индекс роста, %, в постоянных ценах 2010 г., млрд долл.), рассчитанные относительно 2004 г. (2004 г. = 100%).

Модель 1

$$Y = -36,1 + 0,13x_1 + 0,26x_2 - 4,2D_1, \quad R^2 = 0,996,$$

(-26,2)
(15,9)
(13,5)
(-11,5)

где Y – плотность роботизации (ед.), x_1 – валовое накопление основного капитала (индекс роста, %), x_2 – добавленная стоимость производства автомобилей, прицепов и запчастей (индекс роста, %), D_1 – фиктивная переменная, равная единице в 2007–2008 и 2011 гг. и нулю – в остальные годы. Для данной модели средняя относительная погрешность равна 5,09%.

Таблица 5

Плотность роботизации (ед.) и экономические показатели
(индекс роста, в постоянных ценах 2010 г., млрд долл.), (2004 г. = 100%)

Год	Плотность роботизации, ед.	Добавленная стоимость промышленности (включая строительство)	Добавленная стоимость производства автомобилей, прицепов и запчастей	Валовое накопление основного капитала
2004	3	100	100	100
2005	3	104,4	98,3	108,3
2006	3	114,3	87,4	125,0
2007	4	124,4	96,0	148,8
2008	6	131,0	98,3	161,9
2009	9	134,6	96,7	157,6
2010	10	144,7	101,3	157,5
2011	12	158,2	116,5	171,3
2012	15	159,7	109,8	168,3
2013	16	158,7	120,2	166,5
2014	19	167,5	122,0	183,2
2015	22	174,9	125,6	194,4

Источник: авторская разработка по данным [45, 74].

При росте валового накопления основного капитала на 10 п.п. плотность роботизации увеличивается на 1,3 ед. (при постоянном значении добавленной стоимости производства автомобилей, прицепов и запчастей), а рост добавленной стоимости производства автомобилей, прицепов и запчастей на 10 п.п. увеличивает плотность роботизации на 2,6 ед.

Модель 2

$$Y = -32,15 + 0,142x_1 + 0,22x_2 + 3,66D_2, \quad R^2 = 0,99,$$

(-13,3) (2,57) (5,44) (4,96)

где Y – плотность роботизации (ед.), x_1 – добавленная стоимость промышленности (включая строительство) (индекс роста, %), x_2 – экспорт товаров и услуг (индекс роста, %), D_2 – фиктивная переменная, равная единице в 2009 г. и нулю в остальные годы. Для данной модели средняя относительная погрешность равна 2,94%.

При росте добавленной стоимости промышленности (включая строительство) на 10 п.п. плотность роботизации увеличивается на 1,42 ед. (при постоянном значении экспорта товаров и услуг), а рост экспорта товаров и услуг на 10 п.п. увеличивает плотность роботизации на 2,2 ед.

Таким образом, результаты моделирования показывают, что для повышения плотности роботизации необходим значительный рост валового накопления основного капитала, добавленной стоимости промышленности, в том числе добавленной стоимости производства автомобилей, прицепов и запчастей; этому способствует также рост экспорта промышленных товаров и услуг.

ПРОБЛЕМЫ УСКОРЕНИЯ РОБОТИЗАЦИИ В РОССИИ

Общие показатели экономического развития. По данным Росстата, объем ВВП России в 2019 г. составил 110,8% (1990 г. – 100%). Валовое сбережение в % ВВП снизилось с 38,8% в 1990 г. до 27,6% ВВП в 2019 г., валовое накопление – с 36,2 (1991 г.) до 23,1% ВВП в 2019 г. В 2019 г. валовое накопление основного капитала % ВВП составляло 21,0%, что

ниже, чем в 1991 г. (23,2%). Инвестиции в основной капитал составляли в 2019 г. 17,6% ВВП. Индекс физического объема инвестиций в основной капитал в 2019 г. составил всего 75,6% от уровня 1990 г. (100%).

Индекс промышленного производства, в соответствии с Общероссийским классификатором видов экономической деятельности ОК 029-2014 (КДЕС Ред.2) ОКВЭД2, в 2019 г. составил 103,4% (1991 – 100%). Индекс производства отраслей обрабатывающей промышленности, в соответствии с Общероссийским классификатором видов экономической деятельности ОК 029-2007 (КДЕС Ред.1.1) ОКВЭД, в 2019 г. составил всего 85,8% (1991 – 100%).

Доля ВДС обрабатывающих производств % ВВП в 2002 г. составляла 15,2%, в 2016 г. 11,9% ВВП, в соответствии с Общероссийским классификатором видов экономической деятельности ОК 029-2007 (КДЕС Ред.1.1) ОКВЭД, и в 2019 г. 13,1% ВВП, в соответствии с Общероссийским классификатором видов экономической деятельности ОК 029-2014 (КДЕС Ред.2) ОКВЭД2.

Анализ показателей отдельных отраслей обрабатывающей промышленности показал, что производство транспортных средств и оборудования в 2016 г. составляло 67% от уровня 1991 г., производство кокса и нефтепродуктов – 91%. Metallургическое производство и производство готовых металлических изделий выросло всего на 4%, электрооборудования – на 11%, химическое производство – на 35%. Наиболее существенно выросло производство резиновых и пластмассовых изделий – на 185% [30, 31].

За период 1995–2014 гг. численность занятых в обрабатывающей промышленности России снизилась на 25,3% (в Польше сократилась на 10,2% за тот же период).

По данным World Bank, добавленная стоимость производства машин и транспортного оборудования в % к добавленной стоимости обрабатывающей промышленности в целом (% of value added in manufacturing) в 2016 г. составляла в России 8,2% (в Польше 23,2%), а добавленная стоимость обрабатывающей промышленности в % ВВП (Manufacturing, value added, % of GDP) – 12,0% (в Польше 18,1%). При этом доля продукции обрабатывающей промышленности в товарном экспорте (Manufactures exports, % of merchandise exports) в 2018 г. в России составляла 20,6% и в Польше 80,2%, в импорте товаров (Manufactures imports, % of merchandise imports) – 83,3% и 76,2%, соответственно. Особенностью экономики России является зависимость от импорта продукции станкостроения, электроники, сельскохозяйственного и транспортного машиностроения. Доля импорта машин, оборудования и транспортных средств в общем объеме импорта выросла с 31,4% в 2000 г. до 48,6% в 2017 г. (46,1% в 2019 г.) [32].

РОБОТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА В РОССИИ

В 1975–1980 гг. промышленность СССР освоила серийный выпуск 40 моделей роботов, а к концу 1985 г. количество промышленных роботов (ПР) в стране превышало 40 тыс. ед. На тот момент это составляло 40% от общемирового числа ПР и в несколько раз превосходило число роботов, используемых в США [33]. По данным World Robotics 2005, в СССР в 1989 г. парк ПР составлял 62 339 ед., в 1990 г. – 64 204 ед.

После распада СССР парк ПР начал резко сокращаться. В 2018 г. парк ПР России оценивался в 5000 ед. и в 2019 г. более 6 тыс. [34]. Количество ежегодно устанавливаемых ПР в России выросло с 21 ед. в 2002 г. до 1410 ед. в 2019 г., но роботизация производства происходит крайне медленно (в 2004 г. парк роботов в России составлял 5 тыс. ед., в начале 2015 г. – около 8 тыс. ед.), в России ежегодно в течение последних пяти лет закупалось в среднем 460 роботов; для сравнения – в Германии установлено более 130 тыс. роботов, причем в 2016 г. Германия закупила около 20 тыс. ед., а Россия – 359 ед.; пример Польши также показывает значительную разницу в показателях роботизации [35–37]. Стоит отметить, что рост сервисной робототехники в стране опережает рост промышленной [38].

В 2013 г. для выполнения погрузочно-разгрузочных работ использовалось 24% ПР, для сварки – 21%, металлообработки – 17%, покраски – 10% [39]. В 2019 г. на долю роботов, выполняющих операции по перемещению, приходилось 46%, сварку и пайку – 27%, обработку – 4% [34].

Продажи ПР для перемещения увеличились с 134 ед. в 2016 г. до 398 ед. в 2018 г., а для сварки – с 66 до 233 ед., соответственно (табл. 6). При этом доля ПР для перемещения грузов составила 47%, для упаковки, сортировки и размещения – 23%, обслуживания станков – 11%, паллетирования – 10%, литья пластмасс – 5%, для штамповки,ковки и сгибания – 4%. На долю дуговой сварки приходилось 55% из 233 роботов в 2018 г., точечной – 37%, лазерной – 5%, на другие типы сварки – 3% [40].

Таблица 6

Продажи ПР в России по операциям, ед.

Тип операции	2016	2017	2018
Перемещение	134	88	398
Сварка	66	156	233
Обработка	...	37	38
Дозирование	26	12	19
Другие операции	132	213	229

Источник: авторская разработка по данным [41].

В России плотность роботизации составляла в 2019 г. 6 ед. на 10 тыс. занятых в обрабатывающей промышленности [41]. При этом на долю компаний Кука и Fanuc приходится около 90% рынка [42].

На автомобильную промышленность в 2018 г. приходилось 39% продаж роботов – 390 ед. (262 ед. – в 2017 г., 26 – в 2016 г., 61 ед. – в 2010 г.), на машиностроение – 16%, химическую и нефтехимическую промышленность – 1% [43, 44]. Кроме того, в 2017 г. значительный интерес к робототехнике проявился в пищевой промышленности – на ее долю приходилось 4% продаж роботов в 2018 г. [45].

В 2018 г. на автомобильных заводах России работало 378 ПР, 602 ед. – в других отраслях промышленности, из них 19% – в металлургической [46].

О том, на каких операциях используются ПР в машиностроении и каков уровень локализации производства, говорят следующие данные.

В автомобильной промышленности России роботы используются, в основном, для сборки и перемещения грузов; кроме того, они используются и при испытании автомобилей

(например, для тестирования эксплуатационных свойств автомобильных сидений на заводе Volvo используются роботы Kuka [47]).

Так, роботы Kuka используют на заводах АвтоВАЗ и КамАЗ (антропоморфные роботы грузоподъемностью до 1 т, которые могут выполнять большинство сборочных операций и паллетирование).

На заводе КАМАЗ по производству каркасов кабин установлено более 120 промышленных роботов, из которых 106 – сварочные [48], в 2018 г. было установлено еще два сварочных и два транспортировочных робота. Всего на КАМАЗ в 2018 г. было задействовано 297 роботов, из которых 236 – порталные [49]. Промышленные роботы участвуют в производстве коробок передач для тяжелых грузовиков. На предприятии используются роботы компаний Kuka (выполняют сборку и паллетирование), Fanuc, ABB и Yaskawa.

На заводах компании «Группа ГАЗ» задействованы более 600 ПР, из которых 100 ед. – роботы Kuka. На линиях сварки боковин, основания, кузова и сборки-сварки дверей автомобилей установлено более 90 роботов Fanuc [50].

На заводе LADA роботы используются для сварки основания и каркаса кузова. На линии сварки основания кузова Largus и LADA XRAY работает 13 роботов. В 2020 г. планировалось ввести в строй еще два сварочных робота [51]. Кроме того, на конвейере появилось 8 роботизированных тележек для автоматической доставки комплектующих на сборочные посты [52].

В 2019 г. на заводе Naval в Тульской области было установлено более 70 роботов компании ABB. Для точечной и дуговой сварки, а также перемещения деталей используются роботы серий IRB 6700 и IRB 7600, для штамповки – IRB 6660, для прессования деталей – IRB 6660 PT [53].

На заводе ПСМА Рус в Калуге ПР выполняют сварочные работы, наносят лакокрасочное покрытие (первый и последний слой), а также клей-герметик на стекла. На заводе ПР выполняют сварочные операции и клеивают лобовые и задние стекла. На предприятии используется 54 сварочных робота Fanuc [54]. Уровень локализации составляет не более 40%, поэтому в 2020 г. выпуск автомобилей временно приостанавливался из-за недопоставки комплектующих в связи с пандемией; в 2021 г. предполагалось начать производство легкового дизеля Peugeot [55].

В 2016 г. завод Ford во Всеволожске использовал 6 сварочных роботов Kuka, а также ПР для установки стекол (в 2019 г. завод закрыт).

Завод «Автофрамос» оснащен 10 покрасочными роботами [56]. В 2018 г. там было установлено еще 46 роботов Fanuc для сварки, их общее число возросло почти вдвое. Также планировалось установить и покрасочные роботы [57]. В 2019 г. на предприятии установили 42 робота в сварочном цехе [58].

ПР используют также в других отраслях.

На Тихвинском вагоностроительном заводе используется более 80 ПР, которые выполняют сварочные работы, покраску, чистку кузовов перед покраской вагонов (например, для сварки двух типов промежуточных балок применяются роботы Fanuc, а для сварки концевых и промежуточных балок экспортных вагонов – роботы Kuka) [59].

В производстве экскаваторов Hitachi в Тверской области ПР используются для сваривания деталей (поворотная и ходовая рама, стрела, рукоять) [60]. На заводе ДСТ-УРАЛ,

где выпускаются бульдозеры, применяются 15 сварочных роботов портального типа; также роботы используются для покраски [61].

В металлургической промышленности России используется примерно 12% от всех промышленных роботов [62]. Для измерения геометрии трубы, нанесения маркировки, ультразвукового контроля диска железнодорожного колеса и перемещения заготовок на Выксунском металлургическом заводе (производство стальных сварных труб и железнодорожных колес) используется 15 роботизированных комплексов. Для вырезания отверстий в трубе на заводе «Трубодетали» применяются роботы Кука, для сварки – робот Pema. На Благовещенском арматурном заводе роботы используются для обработки корпусных деталей трубопроводной арматуры. На Чусовском металлургическом заводе применяется 5 роботов Fanuc, которые подают рессорные листы в нагревательную печь, затем эти листы передают под пресс, а из прессы помещают в холодильник [63].

В пищевой промышленности ПР используются для нанесения маркировки, резки, сортировки, упаковки и укладки продуктов в контейнеры (например, роботы используются для паллетирования коробок с готовой продукцией в компании Unilever в Тульской области; на мясоперерабатывающем предприятии группы компаний «Черкизово» применяются робот-паллетайзер, робот-укладчик, а также роботы для обслуживания систем клипсования) [64].

В нефтехимической компании СИБУР используются роботы для выгрузки сыпучего сырья; для наклейки этикетки и контроля качества рулонов; для укладки брикетов, паллетирования мешков с сырьем [65].

Роботы Кука предполагается использовать и в банковской сфере, чтобы автоматизировать процесс подсчета и сортировки банкнот, который кассиры и инкассаторы до сих пор выполняют вручную.

В целом, вклад отечественной робототехники в прирост ВВП очень мал и оценивается в размере не более 0,1%. Чтобы достигнуть хотя бы 5%-го вклада в прирост ВВП с помощью роботизированных технологий, необходимо по оценке, приведенной в [66], устанавливать не 713 роботов, как в 2017 г., а 35 тыс. роботов в год.

НАПРАВЛЕНИЯ УСКОРЕНИЯ РОБОТИЗАЦИИ В РОССИИ

По мнению руководителя робототехнического центра фонда «Сколково» А. Ефимова в России нет потребности в эффективном производстве, много нерешенных проблем, связанных с потерями на производстве, поэтому внедрение робототехники является не самой важной задачей [67]. Предприятиям необходимы вспомогательные налоговые инструменты, особенно позволяющие им в кратчайшие сроки получить преференции. Подобные решения успешно реализованы в странах Азии, в том числе в Сингапуре и Южной Корее, а также во Франции и Италии.

В настоящее время на российском рынке доминируют около 15 производителей промышленных роботов, как зарубежных, так и отечественных, при этом в стадии реализации находится около 10 проектов по производству роботов. Учитывая, что затраты на рабочую силу в России ниже, чем в Европе или Китае, российские производители надеются

конкурировать по цене. В стране около 80 интеграторов роботов (2017 г.), но большинство из них не имеют опыта работы с крупными проектами [45].

Чрезвычайно низкий уровень роботизации производства объясняется не только глобализацией и мировым финансовым кризисом, но, главным образом, внутренними проблемами, препятствующими социально-экономическому и научно-технологическому развитию страны. Очевидно, необходимо значительное ускорение процессов реиндустриализации и импортозамещения.

Как показывает опыт Польши и других восточноевропейских стран, курс на реиндустриализацию экономики России, развитие обрабатывающей промышленности, экспорт высокотехнологичной продукции стимулируют использование ПР и должен сопровождаться роботизацией производства.

В первую очередь необходимо выделить следующие задачи:

- значительное повышение валового накопления до 30% ВВП и более, а также валового накопления основного капитала, учитывая, что для этого есть соответствующие возможности – так, в 2018 г. валовое сбережение (30,2%) значительно превышало валовое накопление (22,7%) и валовое накопление основного капитала (21,4%);
- значительное повышение объема промышленного производства и, в первую очередь, производства отраслей обрабатывающей промышленности, увеличение доли ВДС обрабатывающих производств в ВВП; соответственно, ускоренное восстановление станкостроения и электронной промышленности (в 1990 г. в России выпускалось 74,2 тыс., а в 2017 г. – 4368 металлорежущих станков);
- повышение доли добавленной стоимости производства машин и транспортного оборудования в добавленной стоимости обрабатывающей промышленности в целом в 2–3 раза, а доли добавленной стоимости обрабатывающей промышленности в ВВП – в 1,5 раза;
- значительное увеличение доли продукции обрабатывающей промышленности в товарном экспорте;
- реализация соответствующих мер по налоговому стимулированию;
- повышение доли внутренних расходов на НИОКР в ВВП в 2–2,5 раза (в настоящее время этот показатель почти в 3 раза ниже уровня 1990 г.);
- значительное повышение внимания к человеческому капиталу [69–72].

Следует отметить, что по нашим оценкам, для увеличения в 2 раза числа ПР на 10 тыс. занятых требуется повысить долю машиностроительных производств в добавленной стоимости обрабатывающей промышленности в 1,26 раза [73].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, плотность роботизации в Польше увеличивалась значительными темпами, благодаря росту объемов производства в обрабатывающей промышленности, в частности, производства автомобилей и электроники, и в промышленности в целом, а также экспорта товаров и услуг. Этот вывод подтверждается результатами моделирования, свидетельствующими о значимой положительной корреляции плотности роботизации с рассмотренными факторами.

При этом на начальном этапе роботизации решающую роль играло увеличение доли обрабатывающей промышленности.

Результаты моделирования для периода ускоренной роботизации производства в Польше позволяют приблизительно оценить скорость роботизации в зависимости от темпов экономического роста. Так, рост добавленной стоимости обрабатывающей промышленности и промышленности в целом (включая строительство) на 10 п.п. приводит к росту плотности роботизации на 1,89 и 1,42 ед. соответственно, повышение добавленной стоимости производства автомобилей, прицепов и запчастей (в постоянных ценах) на 10 п.п. ведет к росту плотности роботизации на 1,7–2,6 ед., увеличение валового накопления основного капитала на 10 п.п. приводит к росту плотности роботизации на 1,3 ед. Кроме того, рост доли экспорта товаров и услуг также взаимосвязан с повышением плотности роботизации.

Для повышения плотности роботизации в России необходимо также значительное повышение валового накопления основного капитала, объема промышленного производства, обрабатывающей промышленности, в первую очередь производства машин и оборудования, станкостроения и электронной промышленности, принятие мер по налоговому стимулированию, значительное повышение внимания к человеческому капиталу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Index Mundi. Poland vs. Russia. URL: <https://www.indexmundi.com/factbook/compare/poland.russia/economy> (дата обращения: 25.08.2022).
2. Dobroczyński M. The Essence of Economic Relations between Poland and Russia. *Ekonomia/Uniwersytet Warszawski*, 2003.
3. Čtvrtina českých firem plánuje v příštích letech robotizaci. URL: <https://www.investicniweb.cz/news-ctvrtina-ceskych-firem-planuje-v-pristich-letech-robotizaci/> (дата обращения: 07.08.2022).
4. Габарта А. А. Польша: 30 лет от начала социально-экономических трансформаций и 15 лет членства в ЕС // *Современная Европа*. 2019. № 7 (93).
5. Габарта А. А. Эволюция внешнеторговых связей Польши в 2004–2018 гг. // *Мировое и национальное хозяйство*. 2019. № 2-3 (48).
6. Zmiany w przemyśle Polski. URL: <https://epodreczniki.pl/a/zmiany-w-przemysle-polski/DKjGKWrpH> (дата обращения: 12.05.2022).
7. Perspektywy dla Polski. Polska gospodarka w latach 2015-2017 na tle lat wcześniejszych I prognozy na przyszłość: Raport // FOR. – Warszawa: Forum Obywatelskiego Rozwoju, 2017. – 253 p.
8. Poland – EU Budget in my country – European Commission. URL: https://ec.europa.eu/info/strategy/eu-budget_en#projects (дата обращения: 18.05.2022).
9. Особенности инвестирования в Польше. URL: <https://zaganportal.ru/polsha/biznes-polsha/inwestirovanie-v-polshe.html> (дата обращения: 13.05.2022).
10. Kaczyński P.M. Poland in Europe: disappointment or merely hiccup? Working Paper 3/2019 – 31/1/2019.
11. Najlepiej rozwijające się gałęzie przemysłu w Polsce. URL: <https://epodreczniki.pl/a/najlepiej-rozwijajace-sie-galezie-przemyslu-w-polsce/DYtqoHcH5> (дата обращения: 12.05.2022).
12. Berger R. Polish industry outlook. Tackling the gap between labor costs and productivity. 2017.
13. Polski przemysł maszynowy [RAPORT]. URL: <https://www.magazynprzemyslowy.pl/artykuly/polski-przemysl-maszynowy-raport> (дата обращения: 10.05.2022).
14. Nordea. Poland: Economic and Political Overview. URL: <https://www.nordeatrade.com/en/explore-new-market/poland/trade-profile> (дата обращения: 15.04.2021).
15. Wikipedia. FSO Polonez. URL: https://pl.wikipedia.org/wiki/FSO_Polonez (дата обращения: 11.05.2022).
16. Kierowców W. Fabryki silników w Europie i w Polsce. URL: <https://www.wyborcierowcow.pl/fabryki-silnikow-w-europie-i-w-polsce/> (дата обращения: 11.05.2022).

17. W Polsce rośnie produkcja silników. URL: <https://glowny-mechanik.pl/2020/01/31/w-polsce-rosnie-produkcja-silni-kow/#:~:text=W%202018%20roku%20w%20Polsce,z%20wynikiem%20ponad%20323%20tys.> (дата обращения: 11.02.2021).
18. Walewska D. Polska zagłębiem produkcji nowoczesnych silników. URL: <https://moto.rp.pl/biznes/18384-polska-zaglebiem-produkcji-nowoczesnych-silnikow> (дата обращения: 11.05.2022).
19. Polish Investment & Trade Agency. URL: <https://www.paih.gov.pl/sectors/electronics> (дата обращения: 18.05.2022).
20. Electronics Industry in Poland. URL: <https://www.electronics.ca/store/electronics-industry-in-poland.html> (дата обращения: 18.05.2022).
21. Sprzedaż robotów na świecie wzrosła o 6%, w Polsce o 40%. URL: <https://www.plastech.pl/wiadomosci/Sprzedaz-robotow-na-swiecie-wzroslo-o-6-w-Polsce-o-40-14459> (дата обращения: 15.05.2022).
22. Polska nadgania w obszarze robotyzacji. URL: <https://evertiq.pl/news/26467> (дата обращения: 07.05.2022).
23. Poland Robotics. URL: <https://www.trade.gov/market-intelligence/poland-robotics> (дата обращения: 21.01.2021).
24. Evertiq. Pandemia przyspiesza robotyzację polskich firm. URL: <https://evertiq.pl/news/25564> (дата обращения: 07.05.2022).
25. Robotyka w liczbach – najnowsze opracowanie International Federation of Robotics. URL: <https://www.robotyka.com/wiadomosc.php/wiadomosc.1603/robotyka-w-liczbach-najnowsze-opracowanie-international-federation-of-robotics> (дата обращения: 24.12.2020).
26. Raport IFR: sukces polskiej robotyzacji. URL: <https://www.magazynprzemyslowy.pl/artykuly/raport-ifr-sukces-polskiej-robotyzacji> (дата обращения: 09.05.2022).
27. Antosiuk M. W Polsce przybywa robotów przemysłowych. URL: <https://www.elmark.com.pl/blog/w-polsce-przybywa-robotow-przemyslowych> (дата обращения: 15.05.2022).
28. Fernandez-Macias E., Klenert D., Anton J-I. Not so disruptive yet? Characteristics, distribution and determinants of robots in Europe // *Structural Change and Economic Dynamics*, 2021. ISSN 0954-349X, <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2021.03.010>.
29. Robotized Aluminium Frame Production Starts in Poland. URL: https://www.bike-eu.com/home/nieuws/2019/08/robotized-aluminium-frame-production-starts-in-poland-10136337?_ga=2.26851966.233760027.1611246075-997803577.1611246075 (дата обращения: 21.01.2021).
30. Яркин А.П., Комкина Т.А. Обзор показателей развития промышленности РФ // Научно-практический журнал «Концепции». 2018. № 1 (37). С. 107–109.
31. Камараева Е.Я., Максимов Н.А., Пьянова М.В. О налоговых последствиях роботизации // *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. 2017. Т. 13. Вып. 9. С. 1608–1622. DOI: <https://doi.org/10.24891/ni.13.9.1608>.
32. Российский Статистический Ежегодник 2020.
33. Потенциал российских инноваций на рынке систем автоматизации и робототехники. Экспертно-аналитический отчет, РВК, Москва, 2014.
34. Цифры про роботов. Отчет IFR и НАУРР о рынке робототехники. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=NnTJIXNWXXKI> (дата обращения: 28.05.2022).
35. Шушунова Т.Н. Перспективы развития отечественного рынка робототехники в условиях цифровой трансформации экономики // *Россия: тенденции и перспективы развития*. 2019. № 14. Ч. 1. С. 567–569.
36. Цхададзе Н.В. Трансформация промышленности в условиях перехода к «Индустрии 4.0». *Вестник Московского университета МВД России*. 2020; (7): 288–291. DOI: 10.24411/2073-0454-2020-10432.
37. Козловская З. Н. Состояние международного рынка робототехники и перспективы его развития // *Тенденции экономического развития в XXI веке: Материалы II Международной научной конференции, Минск, 28 февраля 2020 года / Редколлегия: А.А. Королёва (гл. ред.) [и др.]. Минск: Белорусский государственный университет, 2020. С. 541–544.*
38. Комкина Т.А., Никонова М.А., Дубинина М.Г. Техничко-экономический анализ отдельных видов сервисных роботов // *Экономический анализ: теория и практика*. 2020. Т. 19. № 10. С. 1965–1986. DOI: <https://doi.org/10.24891/ea.19.10.1965>.
39. Роботизация сварочного производства: мировые тенденции и особенности российского рынка. URL: <https://www.shtorm-its.ru/info/articles/robotizatsiya-svarochnogo-proizvodstva-tendentsii-i-primery-realizatsii/> (дата обращения: 15.05.2022).

40. Конспекты: Российский рынок промышленной робототехники, Алиса Конюховская, НАУРР. URL: <http://robotrends.ru/pub/1917/konspekty-rossiyskiy-rynok-promyshlennoy-robototekhniki-alisa-konyuhovskaya-naurr> (дата обращения: 25.05.2022).
41. Кантышев П. Роботы не приживаются на российских заводах. Ведомости. URL: <https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2016/11/14/664697-roboti-ne-prizhivayutsya> (дата обращения: 22.05.2022).
42. Конюховская А. Рынок промышленной робототехники в России и мире // CONTROL ENGINEERING РОССИЯ. #3 (63), 2016. С. 40–44.
43. Использование промышленных роботов: обзор рынка робототехники в России и мире. 2020. URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/ispolzovanie-promyshlennykh-robotov-obzor-rynka-robototekhniki-v-rossii-i-mire/> (дата обращения: 22.03.2021).
44. Гурлев И.В. Цифровизация экономики России и проблемы роботизации // Вестник Евразийской науки, 2020, №4.
45. IFR. Five Trends in Russian Robotics. URL: <https://ifr.org/post/five-trends-in-russian-robotics#:~:text=175%20million%20rubles-,Growing%20market%20for%20industrial%20robots,Korea%20-%20indicates%20great%20growth%20potential> (дата обращения: 15.05.2022).
46. За год в России внедрено 860 промышленных роботов. Всего в мире – 384 тыс. URL: <http://dialog-e.ru/market-news/766/> (дата обращения: 15.05.2022).
47. Рудич К. Роботы КУКА в России: от автоматизации советского автопрома до гаражных манипуляторов. 2020. URL: <https://hightech-fm.turbopages.org/hightech.fm/s/2020/01/27/kuka-robots> (дата обращения: 28.05.2022).
48. Корпоративный журнал ПАО «КАМАЗ» №2 (50) 2019. URL: <https://kamaz.ru/upload/iblock/515/515cb54856dd3cefcc2829b78257906a.pdf> (дата обращения: 21.05.2022).
49. Состояние роботизации в России в 2018 году. Ритм машиностроения. URL: <https://ritm-magazine.ru/ru/public/robotizaciya-v-rossii#:~:text=Статистика%20роботизации%20в%20России&text=составил%2027%25.,автомобильной%20отрасли%20занято%2038%25%20роботов.> (дата обращения: 18.05.2022).
50. ГАЗ. Роботизация производственных площадок. URL: <https://gazgroup.ru/technology/robots/> (дата обращения: 25.05.2022).
51. Lada. АВТОВАЗ: модернизация производства. URL: <https://www.lada.ru/press-releases/117263.html> (дата обращения: 23.05.2022).
52. Новые роботы: На АВТОВАЗе рассказали о модернизации производства. URL: <https://tlt.ru/vaz/novye-roboty-na-avtovaze-rasskazali-o-modernizacii-proizvodstva/2135636/> (дата обращения: 23.05.2022).
53. Тульский автомобильный завод оснащен роботизированными решениями АВВ. URL: <http://edurobots.ru/2019/09/haval/> (дата обращения: 28.05.2022).
54. Владимирский И. На калужском заводе РСМА Rus (Peugeot Citroen Mitsubishi Automotive) запустили производство полного цикла. URL: <https://autoreview.ru/articles/svoimi-glazami/tochka-peresecheniya> (дата обращения: 28.05.2022).
55. Ильин С. В России наладят производство легкового дизеля Peugeot. URL: <https://motor.ru/news/peugeot-1.6-hdi-rus-14-11-2020.htm> (дата обращения: 28.05.2022).
56. Про завод Пежо-Ситроен-Митсубиши в Калуге. URL: <https://smotra.ru/users/yellow8888/blog/177209/> (дата обращения: 29.03.2021).
57. Владимирский И. Своими глазами: как московский завод Renault готовится к производству нового кроссовера. URL: <https://autoreview.ru/articles/zavody-i-proizvodstva/renault-moscow-plant-2018> (дата обращения: 28.05.2022).
58. В Москве на заводе «Рено» запущен модернизированный цех. URL: <https://sdelanounas.ru/blogs/139620/> (дата обращения: 28.05.2022).
59. На смену выходят роботы. Тихвинский вагоностроительный завод. URL: http://www.tvsh.ru/plant_and_society/2459.html?sphrase_id=61154 (дата обращения: 28.05.2022).
60. Япония в Твери, или как работает завод Hitachi? URL: <https://exkavator.ru/articles/customer/~id=122664> (дата обращения: 28.05.2022).
61. Модернизация завода «ДСТ-УРАЛ». URL: <https://hitmachinery.ru/2021/02/26/modernizaciya-zavoda-dst-ural/> (дата обращения 29.03.2021).
62. Галеев А. Человек освобожденный. Чем больше у нас машин, тем больше у нас людей. URL: <https://journal.omk.ru/journal/06-2020/chelovek-osvobozhdennyu/> (дата обращения: 28.05.2022).

63. Кулагина С. Кто, робот? Машины нас заменят, но не всех и не сразу. URL: <https://journal.omk.ru/journal/06-2020/kto-robot/> (дата обращения: 28.05.2022).
64. Корнилов И. Робот на пищевом производстве: возможности и перспективы // CONTROL ENGINEERING РОССИЯ. #4 (88), 2020. С. 22–25.
65. Промышленная роботизация в России. Сибур диджитал. URL: <https://sibur.digital/78-promyshlennaya-robotizatsiya-v-rossii> (дата обращения: 28.05.2022).
66. Перепелица А. Промышленная робототехника в России: видение интегратора. Системы промышленной роботизации // CONTROL ENGINEERING РОССИЯ. 2019. #2 (80). С. 46–49.
67. Novikov A.V., Barmin A.A., Mudrova A.A., Yasinskaya U.V. State and prospects of industrial robotics in shipbuilding // Journal of Physics: Conference Series. 1333 (2019) 052029. doi:10.1088/1742-6596/1333/5/052029.
68. International Federation of Robotics (IFR). URL: <https://ifr.org/> (дата обращения: 28.05.2022).
69. Комкина Т.А. Анализ рисков деиндустриализации в РФ // Анализ и моделирование экономических и социальных процессов / Математика. Компьютер. Образование: Сб. научн. трудов. Вып. 26. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2019. С. 39–46.
70. Яркин А.П., Комкина Т.А. Обзор показателей развития промышленности РФ: производство транспортных средств и оборудования // Научно-практический журнал «Концепции». 2019. № 1 (38). С. 88–90. DOI: 10.34705/КО.2019.23.46.010.
71. Варшавский А.Е. Проблемы социально-экономического развития страны после завершения активной фазы борьбы с коронавирусом // Научно-практический журнал «Концепции». 2020. №1(39). DOI: 10.34705/КО.2020.39.1.001 (РИНЦ).
72. Fedorov G.M., Kuznetsova T.Y. Datasets on the GRP of Russian regions, GRP sectoral composition and growth rates in 2013–2018 // Data in Brief, Volume 33, 2020, 106551, ISSN 2352-3409. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106551>.
73. Варшавский А.Е. Проблемы многоплановости задачи ускорения научно-технологического и инновационного развития России // Вестник ЦЭМИ, №1. 2018.
74. World Bank. URL: <https://data.worldbank.org/> (дата обращения: 06.09.2022).
75. The Vienna Institute for International Economic Studies, EU KLEMS. URL: <https://euklems.eu> (дата обращения 05.05. 2022).
76. UNECE. URL: <https://w3.unece.org/PXWeb/en> (дата обращения: 16.08.2022).

ГЛАВА 5.

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется IV промышленной революции, реализация которой основана на развитии робототехники, информационно-коммуникационных и других прогрессивных технологий.

Центральным звеном в программе Industry 4.0 является сотрудничество человека и робота. Промышленные роботы (ПР) будут помогать работникам в решении различных задач, помимо повышения производительности труда повысится возможность трудиться для более пожилых рабочих, можно будет выпускать небольшие партии товара благодаря возможности быстрой перенастройки оборудования.

Тенденции развития промышленных роботов характеризуются следующими особенностями: повышением простоты использования, развертывания и обслуживания; созданием коллаборативных роботов; новыми способами управления роботами; усовершенствованием органов «чувств» роботов; повышением показателей эффективности производства при использовании роботов и обучением новых сотрудников с помощью роботов.

Промышленные роботы выполняют следующие задачи: погрузочно-разгрузочные работы, перемещение и упаковку изделий, укладку на паллеты; сварку, монтаж, обработку деталей, нанесение различных составов на поверхность, сборку [1].

Наиболее широко роботы используются в автомобильной промышленности (ежегодные отгрузки выросли с 69,1 тыс. в 2013 г. до 80 тыс. роботов в 2020 г.), однако в структуре парка используемых ПР доля этой отрасли несколько сокращается [2]. Так, внедрение коллаборативных роботов привело к росту доли электронной промышленности в парке роботов и отгрузках (с 36,1 тыс. в 2013 г. до 109 тыс. ед. в 2020 г.).

Однако наша страна отстает от развитых и целого ряда развивающихся стран по числу установленных роботов. При этом производство роботов у нас практически отсутствует, что создает риски для научно-технологической безопасности России [3, 4].

В настоящее время промышленные роботы в России производят несколько компаний: ООО «Торговый дом «АРКОДИМ» (с 2016 г. роботы серии ARKODIM поставляются заказчикам – робот-сварщик, паллетайзер и др.); «БИТ Роботикс» (Москва) – разработчик и производитель дельта-роботов (для пищевой, фармацевтической и упаковочной промышленности); «Рекорд-Инжиниринг» (Екатеринбург) проектирует и производит промышленные манипуляторы, грузозахватные и грузоподъемные приспособления; Eidos Robotics («Эйдос-Робототехника», Казань) – резидент инновационного центра «Сколково» (занимается разработками в области компьютерного зрения, адаптивного управления роботами и коллаборативной робототехники, производит манипуляторы серии Нехарод с шестью степенями свободы). Волжский машиностроительный завод, который ранее был единственным производителем промышленных роботов в стране, прекратил их выпуск в 2015 г.,

однако его универсальные промышленные роботы все еще используются на российских предприятиях.

В России продажи промышленных роботов в 2019 г. составляли 1410 ед., плотность роботизации составляла 6 роботов на 10 тыс. занятых в обрабатывающей промышленности; в 2019 г. у нас насчитывалось более 6 тыс. ПР (в мире – 2,7 млн ед.), причем около 40% заняты в автомобилестроении (в мире – 38%). При этом основными поставщиками промышленной робототехники в Россию являются компании Kuka и Fanuc, а также ABB, которые занимают около 90% рынка, так как отечественных производителей промышленных роботов очень мало [5, 6].

В связи с необходимостью перехода на реиндустриализацию экономики при значительном расширении производства промышленных роботов у нас в стране целесообразно проанализировать, каким образом происходило развитие роботов ведущих зарубежных компаний, рассмотреть основные тенденции изменения технико-экономических показателей основных типов промышленных роботов, разработанных в последние десятилетия для того, чтобы иметь возможность оценивать и прогнозировать показатели отечественной робототехники [7–11].

Основное внимание уделим анализу развития роботов компаний ABB и Fanuc [12]. При этом рассмотрим основные характеристики, области применения, технико-экономические показатели роботов, в том числе проведем анализ изменения цены и массы во времени, а также стоимости единицы массы робота и других удельных показателей в соответствии с методологией, изложенной в работах [13–15].

Глава подготовлена на основе статьи авторов*.

ОСНОВНЫЕ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КОМПАНИЙ

Компания ABB производит промышленные роботы с 1974 г., когда был выпущен электрический промышленный робот IRB 6. В 1975 г. ею был создан первый в мире промышленный робот грузоподъемностью 60 кг, который был использован на автомобильном заводе Saab (Швеция). Роботы компании ABB используются в автомобильной, электронной и пищевой промышленности, фармацевтике, металлургии и при производстве пластмассы. Всего установлено более 300 тыс. роботов, выпускаемых компанией [16].

Компания Fanuc была основана как дочерняя компания Fujitsu Limited в 1955 г. К 1974 г. ею был разработан и успешно внедрен в производство первый промышленный робот, в 1975 г. – первый электроэрозионный проволочно-вырезной станок Fanuc Robocut, а в 1977 г. начался экспорт промышленных роботов. Роботы компании Fanuc используются в автомобильной, пищевой, легкой и химической отраслях, в аэрокосмической отрасли, производстве медицинских изделий, электроники, пластмасс. Компания производит 5 тыс. роботов ежемесячно [17].

Таким образом, для обеих компаний характерен высокий уровень производительности труда, рентабельности по валовой прибыли. Показатель наукоемкости (затраты на

* Варшавский А.Е., Дубинина В.В. Основные тенденции изменения технико-экономических показателей промышленных роботов // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2018. Т. 14. № 10. С. 1916–1935. <https://doi.org/10.24891/ni.14.10.1916>.

НИОКР к общей сумме доходов) компаний находится в диапазоне 3,4–6%. Обе компании производят широкий спектр промышленных роботов. Представляют интерес основные виды и технико-экономические показатели производимых компаниями роботов.

Основные типы роботов компаний ABB и Fanuc. В данном разделе представлены основные характеристики и рассмотрены главные области применения трех групп роботов компаний ABB и Fanuc – большой (свыше 100 кг), средней (до 80 кг) и малой (до 15 кг) грузоподъемности.

Роботы компании ABB. Далее рассмотрены следующие роботы компании ABB: большой грузоподъемности – серии IRB 6400 – для точечной сварки, сборки, обслуживания станков, погрузочно-разгрузочных работ и паллетирования и IRB 6600 – для резки, сварки, упаковки, шлифования, чистки и напыления, обработки материалов, снятия заусенец; средней грузоподъемности – серия IRB 4400 – для резки и удаления заусенец, шлифования и полировки, обслуживания станков, обработки материалов; малой грузоподъемности – серия IRB 2400 – для резки и удаления заусенец, склеивания и герметизации, шлифования и полировки, обработки материалов, обслуживания станков.

Развитие роботов происходило следующим образом. *Роботы большой грузоподъемности:* 1991 г. – модульный IRB 6000 для точечной сварки: грузоподъемность 200 кг; 1994 г. – IRB 6400 для обработки тяжелых предметов и деталей, грузоподъемность 120–200 кг; 1997 г. – IRB 6400R для применения в обрабатывающей промышленности, грузоподъемность 100–200 кг; 2001 г. – IRB 7600 для обслуживания станков и прессов, точечной сварки, погрузки/разгрузки, грузоподъемность 150–500 кг; 2002 г. – IRB 6600 используется большинством производителей автомобилей во всем мире, грузоподъемность 125–225 кг; 2005 г. – IRB 660 для паллетирования, погрузки/разгрузки, грузоподъемность 180–250 кг; 2007 г. – универсальный IRB 6640, грузоподъемность 130–235 кг; IRB 6620 для точечной сварки, грузоподъемность 150 кг; 2010 г. – IRB 460 для паллетирования, грузоподъемность 110 кг; 2013 г. – IRB 6700 (7-е поколение роботов) для точечной сварки, обслуживания станков и погрузки/разгрузки, грузоподъемность 150–300 кг; 2015 г. – IRB 8700 (8-е поколение) используется в литейном производстве, добыче полезных ископаемых, грузоподъемность 800 кг [18].

Роботы средней грузоподъемности: 1979 г. – первый электрический робот IRB 60 для точечной сварки; 1982 г. – IRB 90 с гидроприводом, разработан для точечной сварки; 1986 г. – IRB 2000, приводимый в движение двигателями переменного тока, отличался большим рабочим диапазоном и высокой точностью, грузоподъемность 10 кг; 1994 г. – компактный IRB 4400, который может работать с грузами до 60 кг на больших скоростях; 2005 г. – IRB 260, может быть вмонтирован в малогабаритные производственные ячейки, используется для упаковки, грузоподъемность 30 кг; 2009 г. – IRB 2600, для дуговой сварки, перемещения материалов и работы со станками; грузоподъемность 12–20 кг. *Роботы малой грузоподъемности:* 1974 г. – IRB 6, робот с антропоморфической конфигурацией и микропроцессорной системой управления, предназначен для дуговой сварки, грузоподъемность 6 кг; 1996 г. – IRB 2400, самый популярный промышленный робот, грузоподъемность 5–16 кг; 1998 г. – IRB 340 FlexPicker для подбора и размещения, грузоподъемность 1–2 кг; 2005 г. – IRB 1600, для дуговой сварки, обработки материалов, склеивания, шлифования и удаления заусенцев, грузоподъемность 6–8 кг; 2006 г. – IRB 5500, самый крупный и наиболее гибкий

покрасочный робот, грузоподъемность 13 кг; 2008 г. – IRB 360, высокоскоростной робот-укладчик, отличается увеличенной грузоподъемностью (1-8 кг); 2009 г. – IRB 120, самый маленький в мире многофункциональный промышленный робот, грузоподъемность 3 кг; 2010 г. – IRB 52, компактный покрасочный робот, грузоподъемность 7 кг; 2012 г. – IRB 1520ID, высокоточный дуговой сварочный аппарат, грузоподъемность 4 кг [19,20].

Роботы компании Fanuc. Среди роботов компании Fanuc выделены следующие: большой грузоподъемности – S-420, S-430, S-900, R-1000i, R-2000i, M-410, M-900i; применяются для обработки материалов, транспортировки, погрузки/выгрузки деталей, склеивания, точечной сварки, укладки на паллеты, лазерной резки; средней грузоподъемности – M-10i, M-16i, M-20i, M-420i, M-710i, Arc Mate 120i; применяются для дуговой сварки, сборки деталей, погрузки/выгрузки, транспортировки деталей, обработки материалов; малой грузоподъемности – M-2i, M-3i, M-6i, M-10i, LR Mate 200i, Arc Mate 100i; применяются для транспортировки, погрузки/выгрузки деталей, сварки и резки, см. также [21,22].

Развитие роботов происходило следующим образом. *Роботы большой грузоподъемности:* M-900iA – 6 осевой робот для погрузки/разгрузки, сварки, обслуживания пресса, укладки на паллеты, транспортировки деталей; R-2000 – наиболее востребованные роботы Fanuc в мире, применяются для выполнения любых задач с материалами и точечной сварки; M-2000iA – наиболее грузоподъемный промышленный робот (грузоподъемность 2300 кг), а радиус действия – 4700 мм, обладает защитой запястья и плеча от проникновения воды и может использоваться в тяжелых условиях, применяется в автомобильной промышленности (может поднимать готовые автомобили).

Роботы средней грузоподъемности: M-20iA – легкий и компактный робот с полным запястьем для обработки, транспортировки деталей, погрузки/разгрузки, сварки; M-20iA/20M – применяется для погрузки/разгрузки, сборки и транспортировки деталей; M-10iA/12 – высокоскоростной робот с полным запястьем, применяется в пищевой промышленности для подбора и упаковывания, погрузки/разгрузки, укладки на паллеты, склеивания, герметизации, резки, полировки; серия R-1000 – многоцелевые высокоскоростные роботы, применяются при сварке, погрузке/разгрузке и укладке на паллеты.

Роботы малой грузоподъемности: Arc Mate 0iA – легкий и компактный робот для дуговой сварки; Arc Mate 100iB – сварочный робот с электрическим сервоприводом для высокоскоростной сварки и резки, подбора и размещения, обладает узким запястьем, что обеспечивает легкий доступ к деталям; M-2iA – компактный дельта-робот для подбора и размещения, транспортировки и упаковки, подходит для использования в пищевой промышленности, обладает гладкой, легко очищаемой поверхностью; M-1iA – легкий дельта-робот, может использоваться на сборочной линии для перемещения материалов небольшого веса, применяется при сборке, упаковке в фармацевтической и электронной промышленности, при производстве пластмасс; M-3iA – используется для сбора, перемещения, погрузки/выгрузки, может подавать детали с разных сторон рабочей зоны.

ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РОБОТОВ

В данном разделе рассматриваются тенденции изменения цены и технических показателей (грузоподъемность, радиус действия, точность позиционирования, масса)

роботов компаний ABB и Fanuc. Динамика цены и технических показателей роботов рассматривается для трех выделенных групп роботов, отличающихся по грузоподъемности (см. ранее): роботы большой, средней и малой грузоподъемности; источники данных [23]. Ввиду ограниченного объема главы далее приводятся несколько графиков только для роботов большой грузоподъемности.

Динамика цены роботов. Роботы большой грузоподъемности. За период 1997–2013 гг. цена роботов ABB серии IRB 6400-6600 возросла с 9 тыс. (IRB 6400-120/2.4, 1997 г.) до 29 тыс. долл. (IRB 6640, 2007 г.), что можно объяснить увеличением сложности, повышением точности роботов. В целом для всех рассмотренных роботов ABB зависимость цены P от времени описывается следующим уравнением:

$$P = 1628,4 T - 79,186,$$

где $T = t - 1990$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,76$.

При этом без учета крупного робота IRB 6700 (№ 32) зависимость цены от времени описывается уравнением

$$P = 2168,3 T - 5414,$$

где $T = t - 1990$, $R^2 = 0,87$.

За период 1998-2017 гг. цена роботов Fanuc возросла с 8 тыс. (S-420iW, 1999 г.) до 55 тыс. долл. (R-2000iC/210L, 2016 г.). Для роботов Fanuc аналогичная зависимость имеет вид:

$$P = 1868,3 T - 10391,$$

здесь и далее $T = t - 1990$, где t – текущий год, $R^2 = 0,64$.

Таким образом, тенденции роста цены роботов, выпускаемых двумя компаниями, достаточно близки: за 10 лет прирост цены промышленного робота большой грузоподъемности составляет примерно 16–21 тыс. долл. (рис. 1).

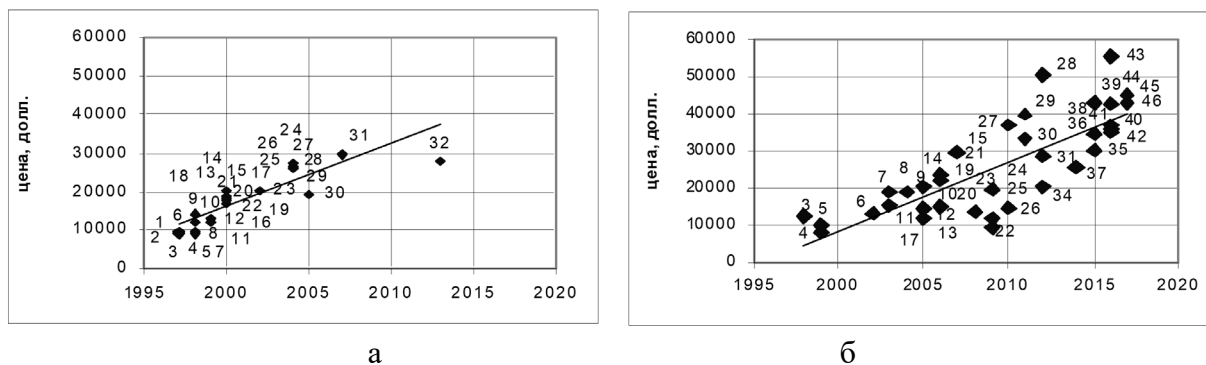


Рис. 1. Зависимость цены (долл.) роботов большой грузоподъемности от времени: а) ABB; б) Fanuc

Источник: авторская разработка по данным [16, 17].

В табл. 1 представлены модели роботов большой грузоподъемности компаний ABB и Fanuc, номера которых используются на графиках.

Таблица 1

Роботы большой грузоподъемности компаний ABB и Fanuc

№ работа	Модель робота
<i>Роботы большой грузоподъемности компании ABB</i>	
1	IRB 6400-120/2.8
2	IRB 6400-120/2.4
3	IRB 6400-120/2.4
4	IRB 6400-120/2.8
5	IRB 6400-200/2.4
6	IRB 6400S
7	IRB 6400-120/2.4
8	IRB 6400-150/2.4
9	IRB 640
10	IRB 6400R-150/2.5
11	IRB 6400R-150/2.8
12	IRB 6400R-150/2.8
13	IRB 6400 Foundry Prime
14	IRB 6600-175/2.55
15	IRB 6600-225
16	IRB 6600-175/2.8
17	IRB 6400R-150
18	IRB 6400R-200
19	IRB 6600-125
20	IRB 6650S
21	IRB 6400R-150/2.8
22	IRB 6400R-200/2.8
23	IRB 6600-175/2.55
24	IRB 6600-175/2.8
25	IRB 6600-175/2.55
26	IRB 6600-225/2.55
27	IRB 6640 Foundry Plus
28	IRB 6650
29	IRB 6620
30	IRB 6600-175/2.8
31	IRB 6640
32	IRB 6700
<i>Роботы большой грузоподъемности компании Fanuc</i>	
1	S-420FD
2	S-420S
3	S-420iF
4	S-420iW
5	S-900H
6	M-410i HW
7	S-430iW
8	S-430iF
9	S-900iB/200
10	R-2000iA/200F
11	S-430iR
12	S-430iL
13	F-200iB
14	R-2000iA/165
15	R-2000iA/165F
16	R-2000iA/165EW
17	R-2000iA/165R
18	R-2000iB/165R

№ робота	Модель робота
19	R-2000iB/200T
20	R-2000iA 125L
21	R-2000iA/200EW
22	M-900iA/350
23	R-2000iB/100H
24	R-2000iB/165F
25	R-2000iB/125L
26	R-2000iB/210F
27	R-1000iA/100F
28	M-900iA/260L
29	R-2000iA/210F
30	R-2000iB/200R
31	M-900iA/600
32	R-2000iB/150U
33	R-2000iB/170CF
34	M-900iA/350
35	R-2000iB/100P
36	R-2000iC/165F
37	M-900iA/200P
38	R-2000iB/210WE
39	M-900iB/400L
40	R-2000iC/125L
41	R-2000iC/210F
42	R-2000iC/270F
43	R-2000iC/210L
44	M-900iB/360
45	R-2000iB/220U
46	M-900iB/280L

Источник: авторская разработка по данным [16, 17].

Роботы средней грузоподъемности. За период 1994–2007 гг. цена роботов ABB серии IRB 4400 возросла с 13 тыс. (IRB 4400-60, 1994 г.) до 30,5 тыс. долл. (IRB 4400-60, 2007 г.). В целом для всех рассмотренных роботов ABB зависимость цены P от времени описывается следующим уравнением:

$$P = 1393,4 T + 4828,9, R^2 = 0,87.$$

За период 1998–2016 гг. цена роботов Fanuc возросла с 15 тыс. (M-710i, 1998 г.) до 30,9 тыс. долл. (ARC Mate 120iC, 2015 г.). Зависимость цены P роботов Fanuc от времени описывается следующим уравнением:

$$P = 783,76 T + 9337,2, R^2 = 0,58.$$

Таким образом, за 10 лет прирост цены промышленного робота средней грузоподъемности составляет примерно 7 тыс. долл. для компании Fanuc и примерно 14 тыс. долл. – для компании ABB.

Роботы малой грузоподъемности. За период 1996–2006 гг. цена роботов ABB серии IRB 2400 возросла с 11,8 тыс. (IRB 2400-10/1.5, 1996 г.) до 26,4 тыс. долл. (IRB 2400L, 2006 г.). В целом для всех рассмотренных роботов ABB зависимость цены P от времени описывается следующим уравнением:

$$P = 1258,7 T + 4864,5, R^2 = 0,83.$$

За период 1995–2014 гг. цена роботов Fanuc возросла с 8,5 тыс. (M6i/Arcmate 100i, 1995 г.) до 22,1 тыс. долл. (LR Mate 200iD/4S, 2014 г.). Зависимость цены P роботов Fanuc от времени описывается следующим уравнением:

$$P = 885,74 T + 4553,1, R^2 = 0,69.$$

Таким образом, за 10 лет прирост цены робота малой грузоподъемности составляет примерно 8-13 тыс. долл.

Динамика массы роботов. Роботы большой грузоподъемности. За период 1997–2013 гг. масса роботов ABB снизилась с 2100 кг (IRB 6400-120/2.8, 1997 г.) до 1250 кг (IRB 6700, 2013 г.). В целом для всех рассмотренных роботов серии IRB 6400-6600 зависимость массы M от времени для $t > 1995$ г. описывается следующим уравнением:

$$M = -72,986 T + 148\ 017, R^2 = 0,48.$$

В период 1994–2017 гг. также произошло снижение массы роботов Fanuc: если в начале периода она находилась в диапазоне 1500–2000 кг, то к концу периода уменьшилась примерно до 1100–1300 кг. Исключение составляют роботы M-900iA/600, M-900iA/200P, M-900iB/400L, применяемые для резки стекловолокна (Fiberglass Cutting), подбора и перемещения деталей. Зависимость массы от времени для всех рассмотренных роботов Fanuc описывается уравнением

$$M = -4,066 T + 9698,1, R^2 = 0,002 (t \geq 1994 \text{ г.}).$$

При исключении трех ранее указанных роботов эта зависимость описывается уравнением

$$M = -20,853 T + 43303, R^2 = 0,16.$$

Таким образом, можно предположить, что в 2020 г. масса роботов ABB в среднем составит 1130 кг, а масса роботов Fanuc – 1390 кг; в 2025 г. – 1045 кг и 1370 кг, соответственно, а без учета роботов Fanuc M-900iA/600, M-900iA/200P и M-900iB/400L масса составит 1240 кг (2020 г.) и 1200 кг (2025 г.).

Роботы средней грузоподъемности. Масса роботов ABB составляет в среднем 1200 кг (за исключением моделей с массой 1040 кг, производство которых началось с 2005 г.). Зависимость массы M роботов ABB от времени для $t \geq 1994$ г. описывается уравнением

$$M = -6,4468 T + 14082, T = t - 1990, R^2 = 0,23.$$

Можно выделить два основных диапазона изменения массы роботов Fanuc: около 130–370 и 500–700 кг, за исключением модели M-710iW (2000 г.) массой 845 кг. Зависимость массы M для всех рассмотренных роботов Fanuc от времени описывается уравнением

$$M = -11,883 T + 24\ 253, T = t - 1990, R^2 = 0,10.$$

Таким образом, можно выделить три диапазона изменения уровня массы роботов средней грузоподъемности: 1040–1200, 560–845, 130–370 кг. Кроме того, можно предположить, что в 2020 г. масса роботов ABB составит около 1120 кг, а масса роботов Fanuc – 250 кг, в 2025 г. – 1110 кг и 230 кг соответственно.

Роботы малой грузоподъемности. У роботов малой грузоподъемности компании ABB масса рассмотренных моделей составляет 380 кг. У роботов компании Fanuc прослеживается снижение массы со временем. Масса роботов снизилась с 290 кг (M6i/Arcmate 100i, 1995 г.) до 14–170 кг. При этом с конца 2000-х гг. масса большей части моделей находится в диапазонах примерно 14-50 кг и 110-170 кг. Зависимость массы M роботов Fanuc от времени описывается уравнением

$$M = -12,178 T + 24570, T = t - 1990, R^2 = 0,48.$$

Можно предположить, что в 2020 г. масса роботов Fanuc в среднем составит 32 кг, а в 2025 г. – 26 кг.

Изменение грузоподъемности роботов. Роботы большой грузоподъемности. Можно выделить несколько диапазонов изменения грузоподъемности роботов АВВ: 120–125 кг, 150–160, 180, 200, 225–235 кг. При этом в 1997-1999 гг. в среднем уровень грузоподъемности был несколько ниже, чем после 2000 г. У роботов Fanuc можно выделить шесть уровней грузоподъемности: 100 кг, 125, 165, 200, 250, 350–400 кг. В целом роботы компании Fanuc отличаются более высоким уровнем грузоподъемности по сравнению с роботами компании АВВ.

Роботы средней грузоподъемности. С конца 1990-х гг. можно выделить четыре уровня грузоподъемности роботов АВВ: 10 кг, 30, 45 и 60 кг. Грузоподъемность роботов Fanuc преимущественно находится в диапазоне 10–70 кг, однако начиная с 2011 г. производятся роботы с грузоподъемностью 80 кг.

Роботы малой грузоподъемности. Можно выделить три уровня грузоподъемности роботов компании АВВ: 7 кг, 10 и 16 кг. До 2013 г. можно выделить два диапазона изменения грузоподъемности роботов компании Fanuc: 5–8 и 2-3 кг, а затем этот диапазон расширился от 0,5 до 8 кг.

Изменение радиуса действия роботов. Роботы большой грузоподъемности. Можно выделить два основных диапазона изменения радиуса действия роботов АВВ – 2400-2550 мм, 2800-3000 мм (за исключением роботов IRB 6650-125/3.2 и IRB 6650 с радиусом действия 3200 мм, которые применяются для точечной сварки и погрузочно-разгрузочных работ; и модели IRB 6620, которая применяется для перемещения предметов, точечной сварки и обслуживания станков с радиусом действия 2200 мм). У роботов Fanuc можно выделить четыре диапазона изменения радиуса действия: 2200 мм, 2400–2600, 3100, 3500–3700 мм.

Роботы средней грузоподъемности. Можно выделить два относительно постоянных диапазона изменения радиуса действия роботов АВВ: 1950 и 2450–2550 мм. Со временем радиус действия роботов Fanuc расширяется: если до 2010 г. он находился в пределах 1500–1800 мм, то затем его максимальная величина повысилась до 2000–2200 мм, а минимальная снизилась до 1400 мм.

Роботы малой грузоподъемности. Можно выделить два относительно стабильных диапазона изменения радиуса действия роботов АВВ: 1500–1550 мм и 1800 мм. У роботов Fanuc можно выделить два основных диапазона изменения радиуса действия: около 800 и 1400 мм. Однако с 2013 г. диапазон радиуса действия расширился – от 300 до 2000 мм.

Изменение точности позиционирования роботов. Роботы большой грузоподъемности. Точность позиционирования роботов АВВ, в основном, находится в диапазоне 0,07–0,2 мм. Зависимость точности позиционирования А роботов АВВ от времени описывается следующим уравнением:

$$A = -0,0057 T + 11,44, R^2 = 0,31.$$

Если в 1990-х гг. точность позиционирования роботов Fanuc составляла 0,4–0,5 мм, то с 2003 г. стали выпускаться роботы с более высокой точностью позиционирования – порядка 0,2–0,3 мм. Зависимость точности позиционирования А роботов Fanuc от времени описывается следующим уравнением:

$$A = -0,0086 T + 17,525, R^2 = 0,29.$$

Роботы обеих компаний используются для точечной сварки, однако компания АВВ выпускает в среднем более точные роботы. Можно предположить, что в среднем в 2020 г. точность позиционирования роботов АВВ составит 0,06 мм, в 2025 г. – 0,055 мм, роботов Fanuc 0,24 и 0,23 мм, соответственно.

Роботы средней грузоподъемности. Точность позиционирования роботов АВВ, в основном, находится в диапазоне 0,05–0,1 мм, за исключением моделей IRB 4400-60 и IRB 4400-60 (0,19 мм). При этом роботы с более высокой точностью позиционирования (0,05 и 0,07 мм) стали выпускаться с 1998 г. Точность позиционирования роботов Fanuc находится в диапазоне 0,04–0,2 мм. Таким образом, можно предположить, что в 2020–2025 гг. точность позиционирования роботов АВВ составит около 0,077 мм, а роботов Fanuc – около 0,07 мм.

Роботы малой грузоподъемности. Зависимость точности позиционирования A роботов АВВ описывается следующим уравнением:

$$A = -0,0003 T + 0,58, R^2 = 0,005.$$

Зависимость точности позиционирования A роботов Fanuc описывается следующим уравнением:

$$A = -0,0029 T + 5,85, R^2 = 0,24.$$

Таким образом, можно предположить, что в 2020 г. точность позиционирования роботов АВВ и Fanuc составит 0,0459 и 0,03 мм, а в 2025 г. – 0,0452 и 0,026 мм соответственно.

ЗАВИСИМОСТЬ ЦЕНЫ ОТ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

В данном разделе рассматриваются зависимости цены от массы, грузоподъемности и точности позиционирования (статистически значимая зависимость цены от радиуса действия для всех групп роботов не была выявлена).

Зависимость цены от массы. Роботы большой грузоподъемности. Зависимость цены P роботов АВВ от массы M описывается уравнением

$$P = 3 \cdot 10^7 \cdot M^{-0,98}, R^2 = 0,31.$$

Увеличение массы на 1% ведет к снижению цены на 0,98%. Цена роботов Fanuc слабо зависит от их массы; можно лишь отметить некоторое снижение цены с увеличением массы. Соответствующая зависимость для роботов Fanuc описывается уравнением

$$P = 153\,269 M^{-0,26}, R^2 = 0,02.$$

Увеличение массы на 1% ведет к снижению цены на 0,26%. При исключении роботов сверхбольшой массы (M-900iA/600, M-900iA/200P, M-900iB/400L) зависимость описывается уравнением

$$P = 1 \cdot 10^7 \cdot M^{-0,89}, R^2 = 0,15.$$

Рост массы на 1% ведет к снижению цены на 0,89%.

Роботы средней грузоподъемности. Можно выделить два диапазона изменения цены роботов АВВ: примерно 13–17 тыс. и 22–30 тыс. долл. У роботов Fanuc выделяются четыре основных диапазона: 14–15 тыс. долл., 19–21 тыс., 25–28 тыс. и 30–32 тыс. долл. Для них получено следующее уравнение:

$$P = 49\,327 M^{-0,13}, R^2 = 0,06.$$

Увеличение массы на 1% ведет к снижению цены на 0,13%. При исключении роботов M-16iB/20 и M-710iB/70 уравнение имеет вид:

$$P = 73942 M^{-0,2}, R^2 = 0,22.$$

Таким образом, рост массы на 1% ведет к снижению цены на 0,2%.

Роботы малой грузоподъемности. Масса роботов компании АВВ одинаковая у всех моделей. Более ранние модели роботов компании Fanuc отличались большой массой (около 290 кг) и относительно низкой ценой. Однако диапазон изменения цены для роботов с массой около 150 кг и роботов более легких (20–50 кг) примерно одинаков – от 15 тыс. до 30 тыс. долл.

Зависимость цены от грузоподъемности. Роботы большой грузоподъемности. Зависимость цены P от грузоподъемности C роботов АВВ описывается следующим уравнением:

$$P = 41,27 C^{1,18}, R^2 = 0,44.$$

При увеличении грузоподъемности на 1% цена увеличивается на 1,18% (рис. 2, а). Для роботов Fanuc при исключении робота сверхбольшой грузоподъемности (M-900iA/600) эта зависимость описывается уравнением

$$P = 2325,2 C^{0,43}, R^2 = 0,08.$$

При увеличении грузоподъемности на 1% цена увеличивается на 0,43% (рис. 2, б).

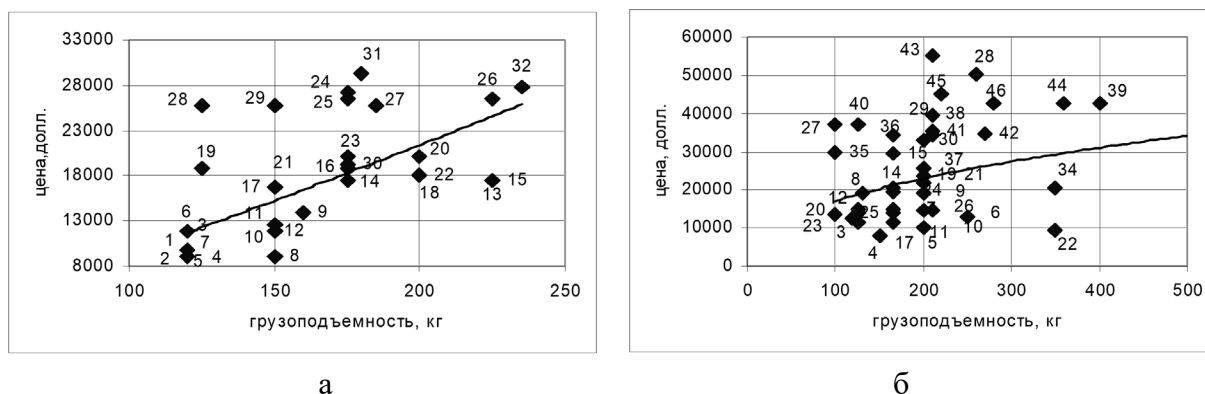


Рис. 2. Зависимость цены (долл.) роботов большой грузоподъемности от грузоподъемности (кг): а) АВВ; б) Fanuc

Источник: авторская разработка по данным [16, 17].

Роботы средней грузоподъемности. Можно выделить три основных диапазона изменения цены роботов АВВ: 13–15 тыс., 16–17 тыс. и 22 тыс. долл. Средняя цена роботов АВВ и Fanuc слабо зависит от их грузоподъемности. В среднем для АВВ примерно 19,5 тыс. долл., Fanuc – 23,7 тыс. долл.

Роботы малой грузоподъемности. Можно выделить три основных диапазона изменения грузоподъемности роботов АВВ: 5–7, 10 и 16 кг. Средняя цена роботов Fanuc также незначительно зависит от грузоподъемности.

Зависимость цены от точности позиционирования. Роботы большой грузоподъемности. Повышение точности позиционирования роботов также сопряжено с ростом цены. Однако при одной и той же точности позиционирования цена роботов может

значительно отличаться. Зависимость цены P роботов АВВ от точности позиционирования A описывается следующим уравнением:

$$P = 1855,8 A^{-1,01}, R^2 = 0,49.$$

Повышение точности позиционирования на 1% ведет к снижению цены на 1,01%. Зависимость цены P роботов Fanuc от точности позиционирования A описывается уравнением:

$$P = 13\,246 A^{-0,43}, R^2 = 0,06.$$

Повышение точности позиционирования на 1% ведет к снижению цены на 0,43%. При этом роботы большой грузоподъемности компании Fanuc в целом менее точные по сравнению с роботами компании АВВ.

Роботы средней грузоподъемности. Статистически значимая зависимость цены от точности позиционирования роботов компаний АВВ и Fanuc не выявлена.

Роботы малой грузоподъемности. При одной и той же точности позиционирования цена роботов обеих компаний может значительно отличаться из-за различной сложности и назначения.

ЗАВИСИМОСТЬ МАССЫ ОТ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

В данном разделе рассматриваются зависимости массы от таких технических показателей, как точность позиционирования, грузоподъемность, радиус действия.

Зависимость массы от точности позиционирования. Роботы большой грузоподъемности. Зависимость массы M всех роботов АВВ от точности позиционирования A описывается уравнением:

$$M = 4513,8 A^{0,39}, R^2 = 0,24.$$

Повышение точности позиционирования на 1% ведет к снижению массы на 0,39% (рис. 3, а). Более легкие роботы Fanuc отличаются более высокой точностью позиционирования. Для всех роботов Fanuc эта зависимость описывается уравнением

$$M = 2900,4 A^{0,58}, R^2 = 0,41.$$

При исключении роботов S-420FD (№ 1), S-900H (№ 5), M-410iHW (№ 6), S-430iW (№ 7), S-430iF (№ 8), S-900iB/200 (№ 9), M-900iB/400L (№ 39), точность позиционирования которых наиболее низка и равна 0,5 мм, зависимость имеет вид

$$M = 4278,3 A^{0,85}, R^2 = 0,52,$$

т.е. повышение точности позиционирования на 1% ведет к снижению массы на 0,85% (рис. 3, б).

Роботы средней грузоподъемности. Масса роботов АВВ средней грузоподъемности находится в диапазоне 1040–1200 кг и практически не зависит от точности позиционирования. В отличие от роботов АВВ более легкие роботы компании Fanuc отличаются более высокой точностью позиционирования. Зависимость массы M роботов Fanuc от точности позиционирования A описывается следующим уравнением:

$$M = 2138,2 A^{0,79}, R^2 = 0,4.$$

Повышение точности позиционирования на 1% ведет к снижению массы на 0,79%.

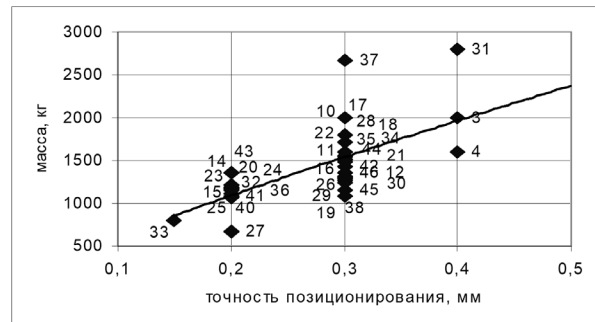
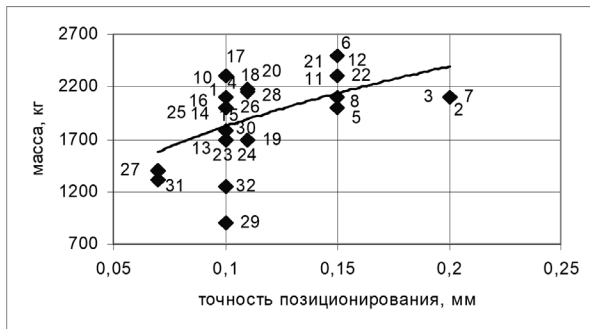


Рис. 3. Зависимость массы (кг) роботов большой грузоподъемности от точности позиционирования (мм): а) АВВ; б) Fanuc

Источник: авторская разработка по данным [16, 17].

Роботы малой грузоподъемности. Масса рассмотренных роботов АВВ одинакова (380 кг). В начале рассматриваемого периода масса роботов Fanuc изменялась в широком диапазоне – от 14 до 290 кг, но затем этот диапазон уменьшился до 45–57 кг. Зависимость массы M роботов Fanuc от точности позиционирования (A) достаточно хорошо описывается уравнением

$$M = 5901,9 A^{1,45}, R^2 = 0,93.$$

Таким образом, повышение точности позиционирования на 1% ведет к снижению массы на 1,45%.

Зависимость массы от грузоподъемности. Роботы большой грузоподъемности. Можно отметить рост массы роботов АВВ при снижении грузоподъемности. Масса роботов Fanuc возрастает с увеличением их грузоподъемности. Зависимость массы M всех роботов Fanuc от грузоподъемности C описывается следующим уравнением:

$$M = 176,92 C^{0,4}, R^2 = 0,27.$$

Повышение грузоподъемности на 1% ведет к увеличению массы на 0,40%. Для роботов с массой 2000 кг и менее (без М-900iA/600, М-900iA/200P, М-900iB/400L) зависимость описывается уравнением

$$M = 399,19 C^{0,24}, R^2 = 0,11.$$

Повышение грузоподъемности на 1% ведет к увеличению массы на 0,24%.

Роботы средней грузоподъемности. Масса роботов АВВ средней грузоподъемности зависит от грузоподъемности. Зависимость массы M роботов Fanuc от грузоподъемности C описывается уравнением

$$M = 42,143 C^{0,65}, R^2 = 0,67.$$

Повышение грузоподъемности на 1% ведет к увеличению массы на 0,65%.

Роботы малой грузоподъемности. Масса рассмотренных роботов АВВ составляет 380 кг. В начале периода можно выделить три основных диапазона изменения массы роботов Fanuc: 290, 110–175 и 14–39 кг. Затем диапазон изменения массы снизился до 24–150 кг. В целом, масса M роботов Fanuc возрастает с ростом грузоподъемности C в соответствии с уравнением

$$M = 30,063 C^{0,54}, R^2 = 0,11.$$

Повышение грузоподъемности на 1% ведет к увеличению массы на 0,54%. При исключении роботов M-6i, ArcMate 100i зависимость описывается уравнением

$$M = 34,259 C^{0,25}, R^2 = 0,04.$$

Повышение грузоподъемности на 1% ведет к увеличению массы на 0,25%.

Зависимость массы от радиуса действия. Роботы большой грузоподъемности.

Зависимость массы M роботов ABB от радиуса действия r описывается уравнением:

$$M = 6,4751 r^{0,72}, R^2 = 0,08.$$

При росте радиуса действия на 1% масса увеличивается на 0,72%. При исключении роботов IRB 6400R-150/2.5 (№ 17), IRB 6400R-200/2.5 (№ 18) и IRB 6650-125/3.2 (№ 19) уравнение имеет вид:

$$M = 0,3041 r^{1,11}, R^2 = 0,17 \text{ (рис. 4, а).}$$

С ростом радиуса действия роботов компании Fanuc масса также возрастает. Соответствующее уравнение имеет вид:

$$M = 0,36 r^{1,05}, R^2 = 0,26.$$

При росте радиуса действия на 1% масса увеличивается на 1,05% (рис. 4, б).

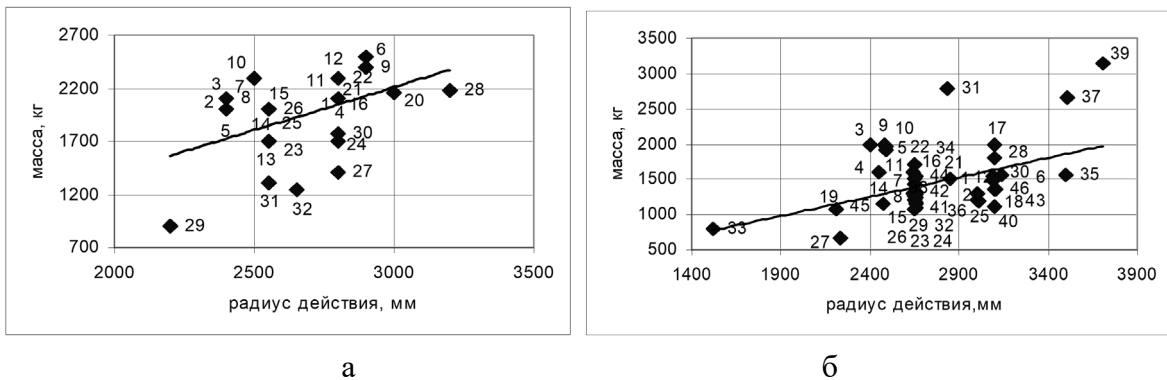


Рис. 4. Зависимость массы (кг) роботов большой грузоподъемности от радиуса действия (мм): а) ABB; б) Fanuc

Источник: авторская разработка по данным [16, 17].

Роботы средней грузоподъемности. Зависимость массы M роботов ABB от радиуса действия r описывается уравнением:

$$M = 568,95 r^{0,1}, R^2 = 0,06.$$

Повышение радиуса действия на 1% ведет к увеличению массы на 0,1%. Зависимость массы M от радиуса действия r роботов Fanuc описывается следующим уравнением:

$$M = 2 \cdot 10^{-6} r^{2,51}, R^2 = 0,3.$$

Повышение радиуса действия на 1% ведет к увеличению массы на 2,51%.

Роботы малой грузоподъемности. Масса роботов компании ABB одинакова для всех роботов (380 кг). Зависимость массы M от радиуса действия r роботов Fanuc описывается следующим уравнением:

$$M = 3 \cdot 10^{-5} r^{2,14}, R^2 = 0,74.$$

Повышение радиуса действия на 1% ведет к увеличению массы на 2,14%. При исключении роботов M-6i, ArcMate 100i зависимость описывается уравнением:

$$M = 0,0005 r^{1,7}, R^2 = 0,74.$$

Повышение радиуса действия на 1% ведет к увеличению массы на 1,7%.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Проведенный анализ не выявил статистически значимой зависимости радиуса действия от точности позиционирования и грузоподъемности, получена лишь зависимость грузоподъемности от точности позиционирования.

Зависимость грузоподъемности от точности позиционирования. Роботы большой грузоподъемности. Зависимость грузоподъемности C роботов АВВ от точности позиционирования A описывается следующим уравнением:

$$C = 73,184 A^{-0,37}, R^2 = 0,21.$$

Повышение точности позиционирования на 1% ведет к повышению грузоподъемности на 0,37%. Соответствующая зависимость для всех роботов Fanuc описывается уравнением

$$C = 268,84 A^{0,30}, R^2 = 0,63.$$

Повышение точности позиционирования на 1% ведет к снижению грузоподъемности на 0,3%. При исключении роботов сверхбольшой грузоподъемности – М-900iА/600 и М-900iА/400L зависимость описывается уравнением

$$C = 209,1 A^{0,13}, R^2 = 0,02.$$

Повышение точности позиционирования на 1% ведет к снижению грузоподъемности на 0,13%.

Роботы средней грузоподъемности. Зависимость грузоподъемности C роботов АВВ от точности позиционирования A описывается следующим уравнением:

$$C = 542,8 A^{1,09}, R^2 = 0,43.$$

При повышении точности позиционирования на 1% грузоподъемность снижается на 1,09%. Зависимость для роботов Fanuc описывается уравнением

$$C = 180,18 A^{0,84}, R^2 = 0,23.$$

При повышении точности позиционирования на 1% грузоподъемность снижается на 0,84%.

Роботы малой грузоподъемности. Зависимость грузоподъемности C роботов АВВ от их точности позиционирования A описывается следующим уравнением:

$$C = 0,2961 A^{-1,2}, R^2 = 0,5.$$

Для роботов Fanuc уравнение имеет вид:

$$C = 8,5279 A^{0,19}, R^2 = 0,06.$$

При повышении точности позиционирования на 1% грузоподъемность снижается на 0,19%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ развития промышленных роботов различного назначения, производимых двумя компаниями – АВВ и Fanuc, свидетельствует о наличии общих тенденций изменения основных технико-экономических показателей в течение достаточно длительного периода времени.

Анализ выявил достаточно близкие тенденции роста цены трех групп роботов различной грузоподъемности. При этом происходило снижение массы во всех трех группах

роботов (за исключением роботов малой грузоподъемности компании АВВ). Наблюдается также в среднем повышение точности позиционирования роботов. Соответственно, снижение массы роботов сопровождается ростом их цены (исключением являются роботы малой грузоподъемности компании АВВ, масса которых одинакова, но цена изменяется в достаточно широком диапазоне).

В то же время при росте грузоподъемности роботов каждой из трех групп наблюдается повышение их цены. Однако зависимость цены от радиуса действия робота во всех трех группах роботов не была выявлена. Повышение точности позиционирования роботов большой грузоподъемности также ведет к росту их стоимости. При этом статистически значимая зависимость цены от точности роботов средней и малой грузоподъемности не была выявлена.

Роботы более высокой точности позиционирования, производимые компанией Fanuc, характеризуются меньшей массой (эта зависимость наблюдается во всех трех группах роботов). Такой характер зависимости наблюдается также для роботов компании АВВ, имеющих наибольшую грузоподъемность.

При росте грузоподъемности в большинстве случаев происходит рост массы роботов. Однако если такая зависимость характерна для всех трех групп роботов компании Fanuc, то для роботов компании АВВ она характерна лишь для группы роботов большой грузоподъемности. Масса роботов повышается также с ростом радиуса действия. Более точные роботы имеют чаще всего меньшую грузоподъемность (такая зависимость характерна для роботов Fanuc всех трех групп грузоподъемности). С помощью выявленных однофакторных зависимостей была проведена также оценка эластичностей изменения ряда показателей, что позволяет оценить различные варианты возможного влияния изменения одних технико-экономических показателей на другие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McKerrow P.J. Introduction to robotics. Sydney: Addison-Wesley Publishing Company, 1991. 811 p.
2. Karabegovic I., Husak E. Significance of Industrial Robots in Development of Automobile Industry in Europe and the World // Journal Engineering Economics. 2012. Vol. 23. No. 4. P. 368–378.
3. Варшавский А.Е. Основные тенденции и показатели развития робототехники // Концепции. 2015. № 1. С. 16–25.
4. Варшавский А.Е. Проблемы развития прогрессивных технологий: робототехника // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2017. Т. 8. № 4s. С. 682–697. URL: <https://doi.org/10.18184/2079-4665.2017.8.4.682-697>.
5. Конюховская А. Рынок промышленной робототехники в России и мире // Control Engineering. 2016. № 3; Робототехника в России: кто сегодня производит промышленных роботов? URL: <https://robo-hunter.com/news/robototehnika-v-rossii-ktosegodnya-proizvodit-promishlennih-robotov10381> (дата обращения: 20.04.2020).
6. Матюшок В.М., Красавина В.А. Мировой рынок новейших ИТ-технологий и национальные интересы // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2017. Т. 13. Вып. 11. С. 1988–2004. URL: <https://doi.org/10.24891/ni.13.11.1988>.
7. Громов Л.М. Руководство по научно-техническому прогнозированию. М.: Прогресс, 1977. 351 с.
8. Martino J.P. Technological Forecasting for Decision Making. McGraw-Hill, 1993. 462 p.
9. Варшавский А.Е., Дубинина М.Г. Синергия производства военной и гражданской продукции (на примере авиационной промышленности) // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2017. Т. 13. Вып. 1. С. 20–33. URL: <https://doi.org/10.24891/ni.13.1.20>.
10. Камараева Е.Я., Максимов Н.А., Пьянова М.В. О налоговых последствиях роботизации // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2017. Т. 13. Вып. 9. С. 1608–1622. DOI: <https://doi.org/10.24891/ni.13.9.1608>.

11. Ларин С.Н., Баранова Н.М., Хрусталёв Е.Ю. Развитие IT-индустрии как определяющая тенденция роста экономики знаний: анализ опыта США и России // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2017. Т. 13. Вып. 4. С. 615–630. DOI: <https://doi.org/10.24891/ni.13.4.615>
12. Дубинина М.Г. Инновационные робототехнические фирмы и перспективные направления развития робототехники // Анализ и моделирование экономических и социальных процессов: Математика. Компьютер. Образование. 2014. Т. 21. № 2. С. 75–82. Shimon Y. Nof: Handbook of Industrial Robotics, 2nd Edition, 1999. 1378 p.; Siciliano B., Khatib O. Springer Handbook of Robotics, Springer Science & Business Media, 2008. 1611 p.
13. Сахал Д. Технический прогресс: концепции, модели, оценки / под ред. А.А. Рывкина. М.: Финансы и статистика, 1985. 366 с.
14. Мартино. Дж. Технологическое прогнозирование. М.: Прогресс, 1977. 591 с.
15. Леонов А.В., Пронин А.Ю. Методология управления созданием высокотехнологичной продукции на этапах формирования научно-технического задела // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2018. Т. 14. Вып. 2. С. 200–220. URL: <https://doi.org/10.24891/ni.14.2.200>
16. ABB Robotics. URL: <http://new.abb.com/products/robotics> (дата обращения: 28.05.2022).
17. Fanuc. URL: <http://www.fanuc.eu/ru/ru/> (дата обращения: 28.05.2022).
18. Robotics. IRB 6700. The Next Generation of Large Industrial Robots. URL: http://robotforum.ru/assets/files/ABB_pdf/ABB_IRB_6700.pdf (дата обращения: 28.05.2022).
19. Маршал Д., Бредин К. История успеха. Вклад АББ в промышленную робототехнику. URL: <http://docplayer.ru/33801365-Istoriya-uspeha-vklad-abb-vpromyshlennuyu-robototehniku-devid-marshal-kristina-bredinvsegda-v-pervyh-ryadah.html>; Hedge G.S. A Textbook of Industrial Robotics. Laxmi Publications, 2006. 219 p.; Miller R.K. Industrial Robot Handbook. Springer Science & Business Media, 1989. 686 p.; Дубинина М.Г. Техничко-экономический анализ военных БПЛА Израиля // Концепции. 2017. № 1. С. 20–28; Комкина Т.А. Особенности развития рынка роботизированных хирургических систем // Концепции. 2017. № 1. С. 29–36.
20. Ross L.T., Fardo S.W., Masterson J.W., Towers R. Robotics: Theory and Industrial Applications. Goodheart-Willcox Company, 2010. 156 p.
21. Макаров И.М., Топчеев Ю.И. Робототехника: история и перспективы. М.: Наука; Изд-во МАИ, 2003. 349 с.
22. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника / пер. с англ. М.: Мир, 1989. 624 с.
23. ABB. Robot Selector. URL: <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/robotselector>; Global robots. URL: <http://globalrobots.com/robots.aspx>; Machineseecker. URL: <https://machineseecker.com/fy/inserat/inseratliste/index?stichwort=industrial+robots&kategorieId=>; (дата обращения: 28.05.2022).

ГЛАВА 6.

АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ ДЛЯ ПАЛЛЕТИРОВАНИЯ, ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ И ПОКРАСКИ

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время темпы автоматизации ускоряются, промышленные роботы распространяются на фабриках по всему миру, расширяется список задач и отраслей, в которых они применяются. Кроме того, увеличивается ассортимент и появляются новые типы роботов – от гибких механических конечностей до умных машин, которые могут работать вместе с людьми. С развитием информационных технологий в промышленной робототехнике происходят постоянные изменения, приводящие к новым функциональным решениям и более широким возможностям применения промышленных роботов.

Целью данной работы является построение моделей зависимости цены промышленных роботов от таких технических характеристик как грузоподъемность (кг), радиус действия (мм), точность позиционирования (мм), масса (кг), а также технический индекс, рассчитанный как произведение грузоподъемности на радиус действия и отнесенный к массе роботов.

Аналогичные исследования проводились по сервисным роботам, где моделировалась зависимость цены от технических показателей для медицинских, персональных роботов и БПЛА [1]; а также по промышленным роботам компаний Fanuc и ABB большой, средней и малой грузоподъемности [2].

Глава подготовлена на основе статьи автора*.

ВЕДУЩИЕ КОМПАНИИ-ПРОИЗВОДИТЕЛИ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Использование промышленных роботов на производстве расширяется. Возможности ПР постоянно совершенствуются, и они способны выполнять более сложные и разнообразные задачи с наибольшей скоростью и точностью. К основным задачам роботов относятся: паллетирование, перемещение и упаковка изделий, сварка, сборка, обработка деталей, покраска.

Так, например, в 2019 г. на долю роботов, выполняющих операции по перемещению, приходилось 42% (в России – 46%), сварку и пайку – 21% (27%), сборку – 10%, обработку – 1% (4%) [3].

В данной работе были рассмотрены ПР для паллетирования компаний Fanuc и Yaskawa Motoman, а также роботы для точечной сварки и покраски компании Kuka.

Роботы компании Yaskawa Motoman используются в автомобильной, аэрокосмической, пищевой, химической промышленности и т.д.; роботы Fanuc – в аэрокосмической,

* Дубинина В.В. Анализ технико-экономических показателей промышленных роботов // Анализ и моделирование экономических и социальных процессов / Математика. Компьютер. Образование: Сб. научн. трудов. Вып. 28. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2021. С. 117–123. DOI: 10.20537/mce2021econ11

автомобильной промышленности, в отрасли товаров народного потребления и многих других отраслях; роботы компании Kuka – в автомобильной, пищевой и электронной промышленности, для производства пластмасс, в металлообработке и т.д.

Эти компании являются ведущими производителями робототехники в мире. К 2021 г. по всему миру было установлено 750 тыс. роботов компании Fanuc, более 500 тыс. ед. – Yaskawa Motoman, 381 тыс. ед. – Kuka (2019 г.), табл. 1.

Таблица 1

Количество установленных ПР за всё время (тыс. ед.)

Компании	2014	2018	2019	2021
Fanuc	250	400	500	750
Yaskawa Motoman	300	360	400	более 500
Kuka	100	350	381	...

Источник: [4–6].

Роботы для паллетирования с помощью специального захвата осуществляют подбор продукции с конвейера и укладывают ее на паллеты. Грузоподъемность роботов-паллетайзеров Motoman составляет 50–800 кг, Fanuc – 40–1700 кг.

Роботы-паллетайзеры Motoman используются на заводах Boeing, Audi; Fanuc – для паллетирования изоляционных материалов, компонентов для грузовых автомобилей DAF, на заводах Honda, Audi, Volkswagen, Hyundai, Nissan, Opel и BMW, в пищевой промышленности – укладывают на паллеты сыры, джемы, консервы и другую продукцию в компаниях Nestlé, Unilever, Budweiser, Coca-Cola и др. В компании Hero AG для заполнения коробок с джемом и укладки их на поддоны применяются три робота Fanuc M-710iC.

Роботизированная точечная сварка является одной из самых востребованных операций на современном производстве. Она обладает высокой производительностью при стабильном качестве выполнения работы. Точечная сварка в основном применяется в автомобильной промышленности. Например, роботы Kuka для точечной сварки сваривают держатель приборной панели на заводе Mercedes, кузова для Jeep Wrangler на заводе Toledo, также применяются в металлургической промышленности.

В России сварочные роботы применяются на заводах Volgabus (производство автобусов, используется 29 роботов Kuka), LADA – 13 сварочных робота, АвтоВаз – 6 ед. В 2019 г. КАМАЗ установил 11 сварочных роботов Kuka [7]. На заводах компании «Группа ГАЗ» задействовано более 600 ПР, из которых 100 ед. – роботы Kuka. На сварочных линиях установлено более 90 роботов Fanuc [8].

Покрасочные роботы используются для выполнения широкого круга задач. Например, в автомобильной промышленности – для покраски и нанесения разнообразных покрытий на колесные диски машин, покраски деталей и кузовов автомобилей; в мебельной промышленности они окрашивают изделия, наносят лак на деревянные поверхности, в электронной – красят крышки ноутбуков.

Покрасочные роботы Kuka используются в компаниях Boeing, Hannex, на автомобильных заводах BMW, Ford, Porsche, Mercedes Benz, Audi, Chrysler, Ferrari.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЦЕНЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ ОТ ИХ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Для построения моделей зависимости рассмотрены роботы Kuka для точечной сварки (8 моделей роботов), произведенные в период 2008–2016 гг. и ценой от 16 тыс. долл. до 52 тыс. долл.; покрасочные роботы Kuka 2002–2015 гг. выпуска и ценой 11–78 тыс. долл. (22 ПР); роботы-паллетайзеры Fanuc – произведенные в период 2003–2017 гг. и ценой 10–55 тыс. долл. (20 ПР), Yaskawa Motoman – 2009–2015 гг. выпуска и ценой от 23 тыс. до 51 тыс. долл. (8 ПР).

Для роботов компании Kuka, предназначенных для покраски и точечной сварки, были построены модели зависимости цены от грузоподъемности, технического индекса и года выпуска.

Технический индекс (TI) рассчитан как отношение произведения грузоподъемности на радиус действия к массе роботов:

$$TI = \frac{\text{Грузоподъемность} \cdot \text{Радиус действия}}{\text{Масса}}.$$

Такой выбор технического индекса связан с тем, что развитие ПР направлено на увеличение их грузоподъемности и радиуса действия при снижении массы.

Моделирование зависимости цены ПР от технических показателей проведено на основании данных, представленных в табл. 2.

Таблица 2

Технико-экономические показатели покрасочных роботов Kuka

Модель робота	Год выпуска	Цена, долл.	Грузоподъемность, кг	Радиус действия, мм	Масса, кг	Точность позиционирования, мм
KR 150	2002	11809	150	2700	1245	0,12
KR 180	2006	11809	180	2700	1267	0,12
KR 210	2005	11809	210	2700	1267	0,12
KR 16 KS-F	2007	13954	16	1801	235	0,1
KR 60 L45-3	2004	13982	45	2430	610	0,25
KR 240	2008	14665	240	2700	1267	0,12
KR 16 KS	2007	15035	16	1801	235	0,1
KR 30 L16	2004	16892	16	3102	700	0,07
KR 150-2	2009	17526	150	2700	...	...
KR 60 L30-3 KS	2007	18520	30	...	615	0,25
KR 360	2006	18645	360	2826	2350	0,15
KR 30-3	2011	18724	30	2033	665	0,15
KR 60-3 F	2009	19764	60	2041	880	0,06
KR 360 L240-2	2007	20882	240	3300	...	...
KR 5 Arc	2015	21184	5	1412	127	0,1
KR 60	2010	21727	60	2033	635	0,2
KR 30-2	2003	21929	30	2033	865	0,15
KR 30 L16-2	2015	25922	16	3102	700	0,07
KR 210-2 F	2009	40737	210	2700	1412	0,06
KR 500 L340-3	2013	49900	340	3325	2411	...
KR 500	2008	52799	500	2836	2350	0,15
KR 500-3	2014	78338	500	2826	2385	...

Источник: авторская разработка по данным [9].

Модели зависимости для покрасочных роботов Кука.

Модель 1

$$P = 12\,770 + 75,1x_1, \quad R^2 = 0,5,$$

(3,5) (4,5)

где P – цена (тыс. долл.), x_1 – грузоподъемность (кг). Здесь и далее в скобках указаны t -статистики.

Модель 2

$$\ln(P) = -152,2 + 0,28 \ln(TI) + 0,08t, \quad R^2 = 0,5,$$

(-3,17) (2,34) (3,35)

где P – цена (тыс. долл.), TI – технический индекс, t – годы.

Получена положительная корреляция между ценой покрасочных роботов и их грузоподъемностью, а также техническим индексом. При этом цена роботов увеличивается с течением времени.

Далее были рассмотрены 8 моделей роботов Кука для точечной сварки, технические характеристики которых приведены в табл. 3.

Таблица 3

Технико-экономические показатели роботов Кука для точечной сварки

Модель робота	Год выпуска	Цена, долл.	Грузоподъемность, кг	Радиус действия, мм	Точность позиционирования, мм	Масса, кг	Технический индекс
KR 6 R1820	2016	16 602	6	1820	0,04	168	65,0
KR 210 R2700-2	2008	20 007	210	2701	0,05	1077	526,7
KR 240 R3330	2013	29 517	240	3326	0,08	2421	329,7
KR 360 R2830	2016	36 222	360	2826	0,08	2385	426,6
KR 150 R2700-2	2014	37 356	150	2701	0,05	1072	377,9
KR 10 R1420	2016	40 800	10	1420	0,04	160	88,8
KR 280 R3080	2015	49 478	280	3076	0,08	2415	356,6
KR 500 R2830	2016	52 799	500	2826	0,08	2385	592,5

Источник: авторская разработка по данным [9].

Для роботов Кука для точечной сварки получена модель вида:

Модель 3

$$\ln(P) = -218,4 + 0,4 \ln(TI) + 0,1t, \quad R^2 = 0,63,$$

(-2,4) (2,4) (2,5)

где P – цена (тыс. долл.), TI – технический индекс, t – годы.

В модели 3 увеличение технического индекса приводит к большему росту цены по сравнению с покрасочными роботами этой же фирмы (модель 2). Увеличение года выпуска робота для точечной сварки повышает его стоимость в большей степени, чем у покрасочного.

Технические показатели роботов компаний Fanuc [10] и Yaskawa [11] использованы для получения следующих моделей.

Модели зависимости для роботов-паллетайзеров:

- компания Fanuc

$$\ln(P) = -104,1 + 0,4 \ln(TI) + 0,1t, \quad R^2 = 0,63,$$

(-3,2) (3,8) (3,4)

где P – цена (тыс. долл.), TI – технический индекс, t – годы.

- компания Yaskawa Motoman

$$\ln(P) = 8,8 + 0,3 \ln(TI), R^2 = 0,55,$$

(14,5) (2,7)

где P – цена (тыс. долл.), TI – технический индекс, t – годы.

Для обеих компаний получена положительная корреляция между логарифмом цены робота и логарифмом технического индекса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе были рассмотрены модели промышленных роботов для выполнения наиболее распространенных операций. Получено, что цена промышленных роботов компаний Kuka, Yaskawa Motoman и Fanuc для различных операций растет с увеличением технического индекса и года выпуска модели. Также выявлена положительная корреляция между ценой роботов и их грузоподъемностью для покрасочных роботов Kuka.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комкина Т.А., Никонова М.А., Дубинина М.Г. Техничко-экономический анализ отдельных видов сервисных роботов // Экономический анализ: теория и практика. 2020. Т. 19. Вып. 10. С. 1965–1986. DOI: <https://doi.org/10.24891/ea.19.10.1965>.
2. Варшавский А.Е., Дубинина В.В. Основные тенденции изменения технико-экономических показателей промышленных роботов // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2018. Т. 14. № 10. С. 1916–1935. <https://doi.org/10.24891/ni.14.10.1916>.
3. Цифры про роботов. Отчет IFR и НАУРР о рынке робототехники. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=NnTJXNWXXKI> (дата обращения: 06.09.2022).
4. Использование промышленных роботов: обзор рынка робототехники в России и мире. URL: https://delprof.ru/upload/iblock/987/DelProf_Analitika_Rynok-robototekhniki.pdf (дата обращения: 06.09.2022).
5. НАУРР. Аналитическое исследование: Мировой рынок робототехники. URL: [http://robotforum.ru/assets/files/000_News/NAURR-Analiticheskoe-issledovanie-mirovogo-rinka-robototekhniki-\(yanvar-2016\).pdf](http://robotforum.ru/assets/files/000_News/NAURR-Analiticheskoe-issledovanie-mirovogo-rinka-robototekhniki-(yanvar-2016).pdf) (дата обращения: 06.09.2022).
6. Сбербанк. Аналитический обзор мирового рынка робототехники 2019. URL: https://adindex.ru/files2/access/2019_07/273895_sberbank_robotics_review_2019_17.07.2019_m.pdf (дата обращения: 06.09.2022).
7. Производственные роботы-манипуляторы KUKA – немецкое качество. URL: <https://vektor.us.ru/blog/obzory/robot-manipulyator-kuka.html> (дата обращения: 04.04.2021).
8. ГАЗ. Роботизация производственных площадок. URL: <https://gazgroup.ru/technology/robots/> (дата обращения 25.03.2021).
9. Промышленные роботы Kuka. URL: <https://www.kuka.com/ru-ru/продукция-услуги/промышленная-робототехника/промышленные-роботы> (дата обращения: 10.01.2021).
10. Промышленные роботы Fanuc. URL: <https://www.fanuc.eu/ru/ru/роботы> (дата обращения: 10.01.2021).
11. Роботы Motoman. URL: <https://ru.yaskawa.eu.com/products/robots> (дата обращения: 10.08.2022).

ГЛАВА 7.

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗВИТИЯ РОБОТОВ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ (ПО ПОКОЛЕНИЯМ)

ВВЕДЕНИЕ

Роботизированная сварка является одним из наиболее успешных применений промышленных роботов. По данным Robotic Industry Association (RIA), в начале 2015 г. в странах Северной Америки для сварки использовалось 40% всех отгруженных роботов (16% – для дуговой сварки, 24% – для точечной [1]), причем в 2017 г. отгрузки роботов для дуговой сварки выросли на 102% по сравнению с 2016 г. [2].

Роботизированные сварочные аппараты обеспечивают безупречную точность, более качественные сварные швы, при этом уменьшается время цикла и повышается эффективность процесса. Использование роботов для сварочных работ помогает заменять людей на опасных участках, ограничивая воздействие паров и снижая риск дугового ожога.

Автоматизация сварочного процесса – очень сложная область, в которой объединяются исследования в робототехнике, сенсорных технологиях, системах управления и в области искусственного интеллекта. С появлением каждого нового материала и метода сварки производители роботов должны использовать более совершенные программные интерфейсы, постоянно адаптироваться к развивающимся достижениям в технологии сварки, создавать настраиваемые режимы в зависимости от материала и толщины шва, задавать другие переменные процесса сварки.

В данной работе представлена эволюция поколений роботов для дуговой сварки основных компаний-производителей (Fanuc, Yaskawa Motoman, ABB и Kuka) с целью установления тенденций технологического развития роботов и прогнозирования их технико-экономических показателей. Методология исследования технологического развития изложена в работах Дж. Мартино [3], Д. Сахала [4], А.Е. Варшавского [5], применена для анализа робототехнических систем в работах Т. Комкиной [6] и М. Дубининой [7].

Глава подготовлена на основе статьи автора*.

ПРЕИМУЩЕСТВА РОБОТИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ

Большинство сварочных процессов потенциально опасны; они генерируют частицы дыма, токсичных газов, создают шум и электромагнитное излучение. Меры, которые необходимо принять для защиты сварщика и связанных с ним работников, являются дорогостоящими и усложняют сварочную операцию или предполагают использование громоздкой защитной одежды. Существует также риск человеческой ошибки. В дополнение к этим опасностям, связанным с процессом, существуют риски сварки в замкнутых пространствах, под водой или в радиоактивных средах.

* Дубинина М.Г. Анализ показателей развития роботов для дуговой сварки (по поколениям) // Анализ и моделирование экономических и социальных процессов / Математика. Компьютер. Образование: Сб. научн. трудов (выпуск 25). № 2. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2018. С. 88–96.

Кроме того, роботизированная сварка обеспечивает высокую точность. Технические характеристики современных роботов для сварки дают возможность добиться точности позиционирования сварочной горелки порядка 0,03–0,05 мм, что является достаточным для большинства сварочных задач.

В период 2005–2012 гг. происходил рост доли роботов для дуговой сварки в общих ежегодных отгрузках роботов для сварки (с 39,8% в 2005 г. до 46,5% в 2012 г.), а их доля в общих ежегодных отгрузках промышленных роботов составляла порядка 12,2–14,7% (табл. 1).

Таблица 1

Динамика доли роботов для дуговой сварки в ежегодных отгрузках роботов, %

Процессы сварки	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Доля роботов для дуговой сварки в общем количестве сварочных роботов	39,8	41,1	41,7	42,3	42,8	43,5	43,6	46,5
Доля роботов для дуговой сварки в общих ежегодных отгрузках промышленных роботов	13,5	13,4	14,2	14,7	12,2	13,2	12,7	13,2

Источник: [8].

Однако фактором, сдерживающим более широкое применение роботов для сварки, является их высокая цена. Так, например, по данным Японской робототехнической ассоциации, средняя стоимость робота для сварки в 2015 г. выросла до 3,03 млн иен (в 2012 г. – 2,93 млн иен, табл. 2). В период 2018–2021 гг. средняя цена роботов для сварки снизилась с 2,95 млн иен до 2,51 млн иен, что, в основном, связано с изменением структуры продаж роботов для сварки. Доля роботов для дуговой сварки в общих отгрузках роботов в Японии сократилась с 17,9% в 2012 г. до 7,9% в 2021 г., однако их доля в общем количестве роботов для сварки выросла с 43,6% в 2017 г. до 57,5% в 2021 г. Кроме того, увеличилась доля экспорта в отгрузках, а средняя стоимость сварочного робота внутри страны почти в 2 раза выше, чем при продаже за границу (в 2021 г. средняя цена робота для сварки внутри страны составляла 5,38 млн иен, а для поставки на экспорт – 2,04 млн иен).

Таблица 2

Динамика ежегодных отгрузок роботов для сварки в Японии

Показатель	2012	2015	2017	2018	2019	2020	2021
Количество роботов для дуговой сварки, ед.	18 305	19 704	21 423	23 500	18 720	17 875	26 583
Доля экспорта в количестве отгруженных роботов для дуговой сварки, %	82,5	82,0	81,7	79,0	76,3	82,5	87,1
Доля роботов для дуговой сварки во всех отгрузках промышленных роботов, %	17,9	14,1	10,2	10,9	10,7	8,1	7,9
Доля роботов для дуговой сварки в отгрузках роботов для сварки, %	46,9	47,5	43,6	51,2	53,4	54,8	57,5
Средняя стоимость одного робота для сварки, млн иен	2,93	3,03	2,88	2,95	2,90	2,76	2,51

Источник: авторская разработка по данным [9].

ПОКОЛЕНИЯ РОБОТОВ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Объектом исследования в данной работе являются роботы для дуговой сварки, разработанные ведущими компаниями (ABB, Fanuc, Kuka, Yaskawa Motoman) в период 1994–

2017 г. Модели роботов этих компаний имеют общую архитектуру, типы компонентов и функциональных характеристик. Современные роботы-манипуляторы для дуговой сварки – это роботы малой грузоподъемности (до 30 кг), которые обладают высокой точностью позиционирования (до 0,02 мм), высокой скоростью перемещения по осям; кисть робота имеет уменьшенные геометрические размеры; роботы имеют полое запястье (серво-двигатели и кабели расположены внутри корпуса манипулятора для защиты от брызг расплавленного металла).

За указанный период в каждой компании сменилось 4 поколения контроллеров, управляющих роботами для дуговой сварки, а у двух компаний (Fanuc и Yaskawa Motoman) появились контроллеры и роботы 5-го поколения. Большинство контроллеров также реализуют аналогичные архитектуры программного обеспечения, они способны управлять одновременно несколькими роботами в режиме реального времени [10]. Все рассматриваемые поколения контроллеров снабжены графическим дисплеем, что позволило реализовать модели окружающей среды в системе Windows. С 1998 г. производители роботов начали внедрять функции обнаружения столкновений, чтобы избежать повреждений роботов, идентификации нагрузки для оптимизации производительности робота, а также многие другие функции (объектно-ориентированное программирование, использование удаленных интерфейсов и т.д.) [11].

Контроллеры роботов компаний, исследуемых в настоящей работе, имеют многоядерную архитектуру, специальные пакеты программного обеспечения для дуговой сварки и безопасности, используют похожие источники питания, особое программное обеспечение для повышения скорости и точности работы. Развитие контроллеров по поколениям шло в направлении увеличения числа контролируемых осей, емкости оперативной памяти, количества цифровых каналов ввода-вывода, скорости обмена информацией в Ethernet, снижении массы контроллеров. Кроме того, каждое следующее поколение контроллеров имеет расширенный набор встроенных функций по сравнению с предыдущим поколением и отличается меньшим энергопотреблением. Последние поколения контроллеров отличаются повышенной компактностью.

В последние годы вопросы безопасности, в дополнение к требованиям технологических процессов, являются наиболее общей причиной изменений и модификаций роботов, их элементов управления и интерфейсов, включая связь с оператором [12].

Одной из основных технических характеристик сварочных роботов является время цикла. Сокращение его даже на миллисекунды позволяет существенно повысить производительность на крупных производствах, например, в автомобильной промышленности.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РОБОТОВ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

В данной работе проанализированы технико-экономические показатели следующих моделей роботов для сварки: компании ABB – роботы серии IRB 1400-1660 (26 моделей, выпущенных в 1994–2016 гг. [13]), компании Fanuc – серии Arc Mate 100i (19 моделей, 1996–2017 гг. [14]), компании Kuka – серии KR 5, 6 и 16 (25 моделей, 1997-2015 гг. [15]), компании Yaskawa – серии EA, MA VA 1400 (23 модели, 2001–2017 гг. [16]). Эти модели

были разделены на 5 поколений: (первое поколение – 16 моделей, второе – 18, третье – 22, четвертое – 31 и пятое – 6), которые имеют следующие характеристики:

I поколение (G1) (1994–2004 гг.) – грузоподъемность от 3 до 16 кг, радиус 1368–1911 мм, точность позиционирования 0,05–0,1 мм, скорость – 280–660 град/сек., цена – до 15 тыс. долл.;

II поколение (G2) (1998–2007 гг.) – грузоподъемность от 3 до 16 кг, радиус 951–1911 мм, точность позиционирования 0,05–0,08 мм, скорость – 280–720 град/сек., цена – от 13 тыс. до 33 тыс. долл.;

III поколение (G3) (2005–2008 гг.) – грузоподъемность от 3 до 16 кг, радиус 1200–3121 мм, точность позиционирования 0,02–0,15 мм, скорость – 460–720 град/сек., цена – от 16 тыс. до 39 тыс. долл.;

IV поколение (G4) (2008–2016 гг.) – грузоподъемность от 3 до 16 кг, радиус 700–3121 мм, точность позиционирования 0,02–0,15 мм, скорость – 460–790 град/сек., цена – до 64 тыс. долл., имеют полое запястье;

V поколение (G5) (с 2015 г.) – грузоподъемность от 7 до 25 кг, радиус 727–2010 мм, точность позиционирования 0,02–0,08 мм, скорость – 700–1000 град/сек., полое запястье (данные по цене в настоящее время отсутствуют).

Таким образом, развитие роботов для дуговой сварки шло в направлении расширения их диапазонов грузоподъемности и радиуса досягаемости, увеличения скорости, точности позиционирования и цены.

Для всех рассматриваемых моделей проанализировано изменение абсолютных и удельных технико-экономических показателей в зависимости от времени и других абсолютных показателей по поколениям. Несмотря на разнообразие рассматриваемых моделей, было получено, что с течением времени происходит рост грузоподъемности роботов для дуговой сварки, увеличение максимальной скорости по осям подвижности, цены (см. табл. 3).

Таблица 3

Оценка параметров модели $Y = a(T - 1993) + b$, T – год выпуска робота за период 1994–2017 гг. (в скобках здесь и далее – t -статистики)

Y	a	b	R^2
Грузоподъемность	0,218 (3,209)	4,270 (3,904)	0,102
Скорость	16,0 (8,156)	331,9 (10,499)	0,433
Цена	1572,1 (8,080)	4226,6 (1,511)	0,543

Источник: авторская разработка по данным [13–16].

Кроме того, были оценены параметры зависимостей ряда абсолютных и удельных показателей от времени по поколениям.

$$Y = a(T - 1993) + c + b_2 G_2 + b_3 G_3 + b_4 G_4 + b_5 G_5, \quad (1)$$

где G_i – фиктивная переменная, равная единице, если модель принадлежит поколению i , и нулю – в противном случае.

Таблица 4

Оценки параметров модели (1)

Показатель	a	b_2	b_3	b_4	b_5	c	R^2
Цена	718 (1,8)	5989 (1,4)	13 811 (2,6)	16 339 (2,2)	...	5409 (1,7)	0,60
Точность позиционирования	0,004 (4,8)	-0,030 (-3,1)	-0,060 (-5,1)	-0,100 (-6,5)	-0,107 (-5,4)	0,053 (6,3)	0,36

Источник: авторская разработка по данным [13–16].

Цена и точность робота растут с течением времени, при переходе к следующему поколению базовый уровень цены растет, а показатель точности позиционирования снижается (что свидетельствует об увеличении точности робота).

Был проведен анализ зависимости абсолютной (Y) и относительной (Y/X_i) скорости для всех исследуемых моделей роботов для дуговой сварки от радиуса (X_1), грузоподъемности (X_2) и точности (X_3) с учетом поколений роботов:

$$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + b(t - 1998) + b_3 G_3 + b_4 G_4 + b_5 G_5 + c, \quad (2)$$

$$Y/X_i = a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + b(t - 1998) + b_3 G_3 + b_4 G_4 + b_5 G_5 + c, \quad (3)$$

$$i = 1, 2, 3.$$

Таблица 5

Оценка параметров моделей (2–3) для абсолютной и относительной скорости по осям подвижности

Показатель	a_1	a_2	a_3	b	b_3	b_4	b_5	c	R^2
Y	-0,10 (-2,8)	6,57 (2,4)	1804,6 (4,1)	16,8 (8,8)	...	...	...	397,7 (7,7)	0,56
Y	-0,08 (-2,0)	9,37 (3,1)	2036,7 (3,8)	...	155,3 (4,5)	141,7 (4,3)	337,9 (6,2)	393,8 (6,8)	0,47
Y/X_1	-0,0003 (-7,0)	...	...	...	0,08 (2,3)	0,08 (2,5)	0,35 (6,2)	0,73 (11,9)	0,53
Y/X_2	...	-9,35 (-10,5)	...	2,74 (4,5)	...	...	...	138,6 (17,0)	0,57
Y/X_3	...	...	-185 351 (-10,1)	...	3937,0 (2,9)	4984,7 (3,8)	12239 (5,7)	20292 (12,7)	0,71

Источник: авторская разработка по данным [13–16].

Таким образом, абсолютная скорость роботов уменьшается с ростом радиуса досягаемости и увеличивается со временем. Кроме того, происходит рост базовой скорости роботов при переходе к следующему поколению. Относительная скорость роботов Y/X_i уменьшается с ростом показателя X_i , но увеличивается со временем или при переходе к следующему поколению.

Были получены также оценки многофакторной зависимости удельной цены в расчете на единицу показателя от величины соответствующего показателя с учетом поколения развития в виде:

$$Y/X = a X + b_2 G_2 + b_3 G_3 + b_4 G_4 + c, \quad (4)$$

где Y – цена робота.

Полученные результаты (табл. 6) свидетельствуют, что с ростом показателя удельная цена уменьшается, но при переходе к следующему поколению ее базовый уровень растет для всех рассматриваемых моделей роботов для дуговой сварки.

Таблица 6

Оценки параметров модели (4) для относительной цены

Показатель X	a	b_2	b_3	b_4	C	R^2
Грузоподъемность	-465,3 (-5,4)	2603 (3,1)	4690 (6,1)	4818 (5,8)	4069 (5,6)	0,56
Радиус	-0,002 (-1,2)	6,78 (3,4)	12,99 (6,6)	17,67 (8,9)	9,65 (2,8)	0,64
Энергопотребление	-1484 (-3,3)	6510 (1,3)	12241 (2,7)	14344 (3,1)	6673 (1,6)	0,62
Скорость	-0,08	25,7	42,7	51,6	56,6	0,59
	(-5,2)	(4,1)	(6,8)	(7,9)	(7,3)	

Источник: авторская разработка по данным [13–16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное в работе исследование позволило выявить основные направления технологического развития рассмотренных моделей роботов для дуговой сварки. К ним относятся повышение максимальной угловой скорости по осям подвижности, повышение точности позиционирования робота, сокращение времени цикла сварки, расширение диапазонов грузоподъемности (от 3 до 25 кг) и радиуса досягаемости (от 541 до 3150 мм).

Анализ изменения абсолютных и относительных показателей роботов по поколениям показал, что внутри поколений происходит снижение стоимости робота на единицу показателя (радиуса, грузоподъемности, скорости, энергопотребления) при росте показателя, но при переходе к следующему поколению базовая стоимость возрастает. Отношение скорости роботов к абсолютному показателю (грузоподъемности, радиусу, точности) снижается с ростом показателя, но растет относительно времени изготовления модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Burnstein J. Robotic Market Trends in North America. RIA, 2015. URL: <http://slideplayer.com/slide/10376149/> (дата обращения: 09.01.2022).
2. RIA. North American Robotics Market Surges 32 Percent in Unit Volume URL: https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-News/North-American-Robotics-Market-Surges-32-Percent-in-Unit-Volume/content_id/6514 (дата обращения: 09.01.2022).
3. Мартино Дж. Технологическое прогнозирование. М.: Прогресс, 1977.
4. Сахал Д. Технический прогресс: концепции, модели оценки. М.: Финансы и статистика, 1985.
5. Варшавский А.Е. Научно-технический прогресс в моделях экономического развития. Методы анализа и оценки. М.: Финансы и статистика, 1984.
6. Комкина Т.А. Особенности развития рынка роботизированных хирургических систем // Научно-практический журнал «Концепции». 2017. № 1 (36). С. 29–36.
7. Дубинина М.Г. Техничко-экономический анализ военных БПЛА Израиля // Научно-практический журнал «Концепции». 2017. № 1 (36). С. 20–28.
8. Karabegović I., Karabegović E., Pašić S., Isić S. Worldwide Trend of the Industrial Robot Applications in the Welding Processes // International Journal of Engineering & Technology. 2012. Vol. 12. No. 1. P. 69–74.

9. JARA. Production and Shipments of Manipulators and Robots by Applications 2013-2017. URL: <http://www.jara.jp/e/> (дата обращения: 09.01.2022).
10. Quarta D., Pogliani M., Polino M., Maggi F., Zanchettin A. M., Zanero S. An Ex-perimental Security Analysis of an Industrial Robot Controller URL: <http://robosec.org/downloads/paper-robosec-sp-2017.pdf> (дата обращения: 09.01.2022).
11. Pires J. N., Loureiro A., Bolmsjo G. Welding robots: technology, systems issues and applications. Springer. 2006. 180 p.
12. Pilat Z., Klimasara W. J., Juszyński Ł., Michnik A.: Research and development of rehabilitation robotics in Poland. ROВTEP 2014 // Applied Mechanics and Mate-rials. 2014. Vol. 613. P. 196–207.
13. ABB. Robot Welding. URL: <http://new.abb.com/products/robotics/applications-by-industry/robot-welding> (дата обращения: 09.01.2022).
14. Fanuc Arc Welding Robots. URL: <http://www.fanuc.eu/de/en/robots/robot-filter-page/arc-welding> (дата обращения: 09.01.2022).
15. KUKA robots for arc welding. URL: <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/industrial-robots> (дата обращения: 09.01.2022).
16. Motoman Arc Welding Robots. URL: <https://www.motoman.com/robotic-welding> (дата обращения: 09.01.2022).

ГЛАВА 8.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ВОЕННЫХ БПЛА (на примере БПЛА Израиля)

ВВЕДЕНИЕ

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) доказали свою полезность в течение последнего десятилетия. Спрос на новые технологии и расширение возможностей за пределы визуального наблюдения и разведки стимулировал экспоненциальный рост рынка БПЛА. Дальнейшее развитие технологий направлено на совершенствование этих систем и средств радиоэлектронной борьбы, усложнение возможности обнаружения БПЛА, повышение их полезных нагрузок, снабжение вооружением. Благодаря миниатюризации высокоточных боеприпасов БПЛА могут решать задачи мониторинга потенциальных целей и быстрого их поражения. Однако имеют они и свои недостатки, например, уязвимость для электронной атаки.

В области технологий БПЛА лидирующие позиции в мире занимают компании США и Израиля. Особенностью Израиля является то, что почти 60 лет в своей истории страна участвует в военных действиях. При этом человеческие потери считаются недопустимыми. Кроме того, страна располагает развитым сектором высоких технологий. Все эти факторы определили стратегию Израиля на развитие военных роботизированных систем [1], что предполагает повсеместное их использование в военных действиях, доведение через 10–15 лет числа беспилотных систем до трети всей военной техники, решение беспилотными системами широкого круга военных задач, не подвергая риску жизни солдат.

Разработка первых беспилотных летательных аппаратов началась в Израиле в 1971 г. Сначала были созданы дистанционно пилотируемые летательные аппараты (ДПЛА), которые затем были модернизированы и снабжены программируемой системой автопилота, что превратило их в беспилотные летательные аппараты. Первым БПЛА был IAI Scout, совершивший разведывательные действия в ходе ливанской войны 1982 г.

В настоящее время Израиль является крупнейшим в мире экспортером БПЛА. По данным SIPRI, на долю Израиля приходилось 60,7% поставок всех БПЛА в период 1985–2014 гг. [2]. Согласно исследованию международной консалтинговой фирмы Frost & Sullivan [3], израильские компании – производители БПЛА, заработали 4,6 млрд долл. на их продажах в течение 2005–2012 гг. Это включает в себя экспорт самих аппаратов, операционных систем и систем связи, полезную нагрузку для БПЛА. Однако конкуренция за рынок БПЛА усиливается. Израильские производители, являющиеся ведущими мировыми экспортерами военных дронов, в 2013 г. столкнулись с новыми правилами, действующими в отношении оборонных поставок на экспорт, которые позволяют ограничить зарубежные продажи. Кроме того, существенно увеличил производство и экспорт своих БПЛА Китай [4].

В данной статье анализируются основные технико-экономические показатели поколений различных видов военных БПЛА Израиля. Глава подготовлена на основе статьи автора*.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА БПЛА В ИЗРАИЛЕ

По принятой Международной ассоциацией по беспилотным системам (Association for Unmanned Vehicle Systems International, AUVSI) классификации [5], в Израиле производятся модели БПЛА 7 типов (табл. 1). По количеству разрабатываемых моделей существенно увеличилась доля мини- и микро-БПЛА (с 14% в 2004 г. до 38,3% в 2021 г. для мини- и с 4 до 17,5% за тот же период – для микро-), что соответствует общей тенденции к миниатюризации беспилотников. В то же время значительно сократилась доля БПЛА с малой дальностью полета (с 32 до 5% соответственно).

Таблица 1

Динамика структуры по количеству выпускаемых моделей БПЛА в Израиле, %

Тип БПЛА	2004	2007	2010	2014	2015	2016	2018	2021
Микро-БПЛА	4,0	3,2	3,75	6,7	6,3	7,4	13,0	17,5
Мини-БПЛА	14,0	22,6	23,75	26,7	29,7	30,6	41,7	38,3
Легкие БПЛА для переднего края обороны (CR)	22,0	24,2	27,5	25,7	25,2	22,3	10,4	10,8
Легкие БПЛА с малой дальностью полета (SR)	32,0	16,1	15	11,4	11,7	10,7	6,1	5,0
Средние БПЛА (MR)	12,0	19,4	17,5	15,2	14,4	16,5	14,8	13,3
Средние БПЛА с большой продолжительностью полета (MRE)	6,0	3,2	1,25	4,8	4,5	4,1	1,7	1,7
Средневысотные БПЛА с большой продолжительностью полета (MALE)	6,0	9,7	11,25	6,7	6,3	6,6	7,8	9,2

Источник: авторская разработка по данным [6].

Основными производителями БПЛА в Израиле являются компании Israel Aerospace Industries и Elbit Systems, которые выпускают близкие по классу и характеристикам аппараты и тем самым конкурируют друг с другом на внутреннем и внешнем рынках.

Israel Aerospace Industries (IAI) является государственной организацией, в которой на настоящее время на производстве дронов занято более 1000 человек. В 2020 г. объем продаж компании составил 4,2 млрд долл., 72% из которых были получены за счет экспорта. Портфель заказов в 2020 г. достиг 12,6 млрд долл., а чистая прибыль составила 133 млн долл. [7]. Сейчас IAI работает над новым поколением дронов-невидимок с бесшумными моторами.

Elbit Systems (ES) – крупный частный оборонный военный концерн Израиля, его доходы в 2021 г. составили 5,3 млрд долл., численность занятых превышала 17,7 тыс. человек. Концерн занимается разработкой и производством БПЛА, авионики (бортового радиоэлектронного оборудования), средств радиолокации, созданием разведывательных спутников.

* Дубинина М.Г. Технико-экономический анализ военных БПЛА Израиля // Научно-практический журнал «Концепции». 2017. № 1 (36). С. 20–28.

Одно из современных направлений исследований компаний IAI и ES – разработка полезных нагрузок для дальнего сбора разведывательной информации, морских операций, наблюдения за целями в режиме реального времени. На этом рынке компании Израиля занимают лидирующее положение. Некоторые израильские беспилотники могут нести несколько полезных нагрузок одновременно. Все это позволяет расширять использование беспилотных летательных аппаратов, в том числе в гражданских целях, для правоохранительных органов, поисково-спасательных работ и сельского хозяйства.

По количеству поставок на экспорт самым продаваемым БПЛА в Израиле является Searcher (включая все модификации этого беспилотника), на его долю приходится 23,5% всего количества заказов БПЛА другими странами за период 1985–2020 гг. Далее следуют Heron – 15,4% и Hermes-450 – 13,1% (табл. 2). Однако по сумме средств, полученных от продажи БПЛА, первое место занимает Heron.

Таблица 2

Структура поставок БПЛА Израилем другим странам за 1985–2020 гг.
по наименованиям, %

Название БПЛА	Компания	Тип БПЛА	Доля в общем количестве заказов, %
Searcher	IAI	MR	23,46
Heron	IAI	MALE	15,40
Hermes-450	ES	MRE	13,15
Hunter	IAI	MR	12,32
Scout	IAI	CR	8,41
Aerostar	ADS	SR	6,99
Pioneer	IAI	CR	5,69
Ranger	IAI	MR	4,74
Hermes-900	ES	MALE	3,08
Heron-TP/Eitan	IAI	MALE	2,73
Orbiter-3	ADS	CR	1,78
I-View-150	IAI	SR	0,95
Blue Horizon	EMIT	MR	0,71
Dominator-2	ADS	MALE	0,59
Всего			100,0

Источник: авторская разработка по данным [8].

СРЕДНЕВЫСОТНЫЕ БПЛА С БОЛЬШОЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬЮ ПОЛЕТА (КЛАСС MALE)

В данной работе проведен генетический анализ БПЛА Израиля двух классов: MALE (Medium-altitude long-endurance, средневысотные с большой продолжительностью полета) и MR (Medium Range, среднего радиуса действия). С этой целью были выделены модели, построенные на одном и том же принципе, имеющие одинаковый состав и технологии производства и предназначенные для выполнения одинаковых задач [9, 10].

БПЛА класса MALE обычно являются многоцелевыми аппаратами, способными, помимо задач разведки, наблюдения и наведения на цель, нести на борту оружие и выполнять транспортные функции (сброс и принятие на борт груза). Согласно классификации, они имеют максимальную взлетную массу до 1–1,5 т, продолжительность полета 24–48 ч,

высоту полета – более 5–8 км и дальность – около 500 км. В Израиле этот класс БПЛА представляют аппараты Heron компании IAI, Hermes-900 компании Elbit Systems, Dominator компании Aeronautics Defense Systems (ADS) и др. (см. табл. 3). Эти БПЛА имеют одинаковую конструкцию крыла (фиксированное, самолетного типа).

Таблица 3

Характеристики израильских БПЛА класса MALE

Название	E-Hunter	Heron	Hermes 1500	Dominator	MERCURY 3	Dominator II	Hermes 900	Super Heron
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
Фирма-производитель	IAI	IAI	ES	ADS	EMIT	ADS	ES	IAI
Год	1994	1994	1998	2005	2005	2009	2009	2014
Длина, м	7,47	8,5	9,4	н.д.	н.д.	8	8,3	н.д.
Размах крыла, м	16,6	16,6	15	8	10	13,42	15	17
Высота, км	н.д.	10	10	н.д.	н.д.	9,1	9,1	н.д.
Дальность, км	200	350	200	н.д.	200	н.д.	2500	250
Мощность, кВт	н.д.	73,5	84,5	117,7	84,6	202	86	147
Максимальная скорость, км/ч	200	207	240	354	260	230	220	280
Максимальная взлетная масса, кг	954	1270	1500	800	550	1100	1100	1450
Продолжительность полета, ч	25	30	24	28	30	28	36	45
Масса полезной нагрузки, кг	114	450	400	410	н.д.	373	300	450
Цена, млн долл.	8	10	н.д.	16,0	н.д.	17,5	10	20

Источники: [7, 11–14].

Первое поколение представляют БПЛА E-Hunter, Heron и Hermes 1500, производившиеся в 1994–1998 гг., второе – Dominator и Mercury 3 (2005 г.), третье – Dominator II и Hermes 900 (2009 г.), четвертое – Super Heron (2014 г.). Изменение основных и вспомогательных технических параметров БПЛА этого класса представлено на рис. 1. MALE второго поколения меньше по размеру (размах крыла и максимальная взлетная масса), но развивают более высокую скорость.



Рис. 1. Изменение средних по поколениям технических характеристик БПЛА класса MALE Израйля

Источник: авторская разработка по данным [7, 11–14].

Второе поколение имеет более совершенное оборудование, включающее расширенный набор датчиков, систему идентификации друга или врага (IFF), автоматические

системы управления полетом, взлета и посадки. БПЛА третьего поколения этого класса обладают высокой дальностью и намного большей продолжительностью полета при увеличении размаха крыла и потребляемой мощности. Кроме того, они снабжены средствами радиоэлектронной борьбы, цифровой системой обмена данными, что позволяет передавать информацию и фотоматериалы в режиме реального времени.

Особенностью Super Heron, представляющего 4-е поколение БПЛА, является использование дизельного двигателя, обладающего мощностью, в 2 раза большей, чем у Heron, а также конструкция аппарата, которая обеспечивает снижение сопротивляемости на 5% для большей эффективности полета. Новые поколения БПЛА имеют усовершенствованную авионику, большую скорость набора высоты, усовершенствованные системы связи, возможность работы с несколькими датчиками (до 6 одновременно).

Анализ технических показателей свидетельствует о росте доли полезной нагрузки в максимальной взлетной массе и увеличении скорости за период 1994–2014 гг. (рис. 2).

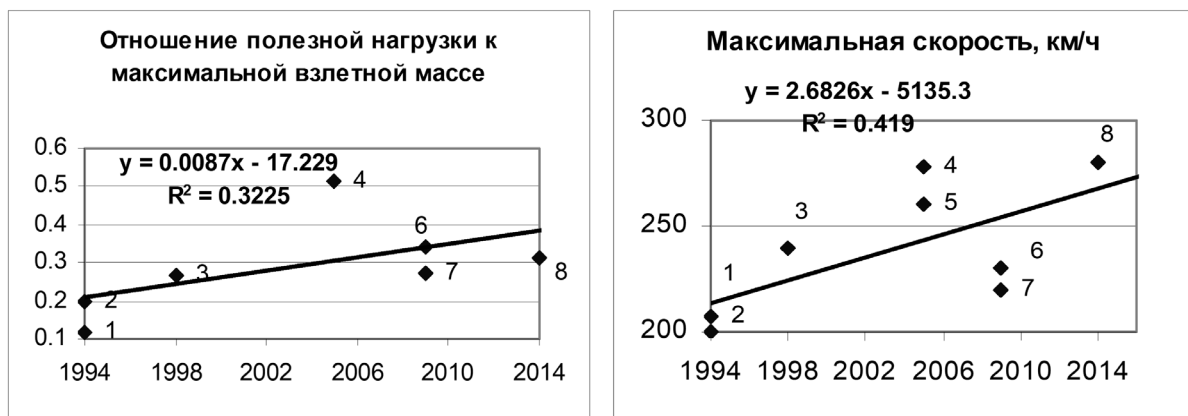


Рис. 2. Изменение во времени показателей для различных БПЛА Израиля класса MALE

Источник: авторская разработка по данным [7, 11–14].

Кроме того, удельная мощность на 1 м размаха крыла и на 1 кг максимальной взлетной массы снижаются с ростом размаха крыла и массы соответственно (рис. 3).

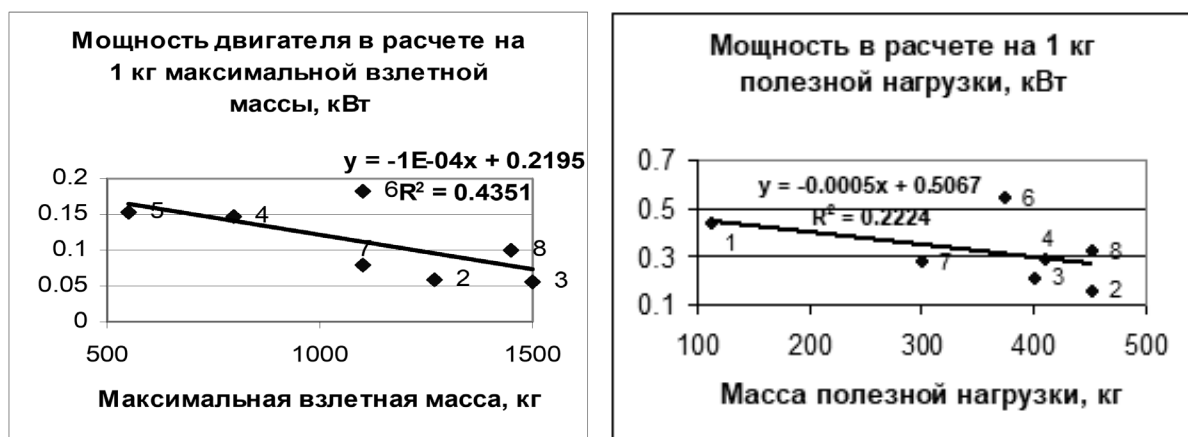


Рис. 3. Зависимость удельной мощности двигателя БПЛА от соответствующего показателя

Источник: авторская разработка по данным [7, 11–14].

Несмотря на ограниченность данных, имеющаяся информация позволяет сделать вывод о снижении стоимости БПЛА в расчете на 1 кг максимальной взлетной массы и полезной нагрузки при увеличении взлетной массы и полезной нагрузки соответственно (рис. 4).

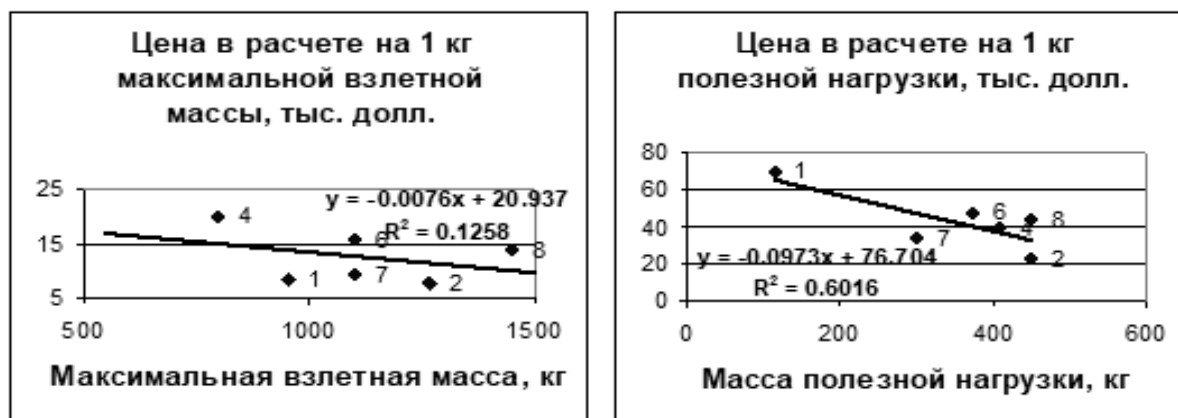


Рис. 4. Изменение удельной цены БПЛА от соответствующего показателя

Источник: авторская разработка по данным [7, 11–14].

БПЛА СРЕДНЕГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ (КЛАСС MR)

К БПЛА этого класса относятся аппараты со взлетной массой 150–500 кг, дальностью 70–200 км, продолжительностью полета 6–10 часов и высотой полета около 5 км. К ним относятся Searcher всех модификаций компании IAI, Blue Horizon компании EMIT Aviation (EMIT) и др. (табл. 4).

Таблица 4

Технические характеристики БПЛА среднего радиуса действия

Название	Производитель	Год	Длина, м	Размах крыла, м	Высота, км	Дальность, км	Мощность, кВт	Максимальная скорость, км/ч	Максимальная взлетная масса, кг	Продолжительность полета, ч	Масса полезной нагрузки	Цена, млн. долл.
Ranger	IAI	1990	4,6	5,7	5,5	180	31,5	240	285	9,0	45	3,33
Searcher I	IAI	1992	5,2	7,2	4,6	220	25,7	198	372	14,0	63	3
Sniper	ES	1992	3,8	5,2	4,6	200	28	175	170	6,0	25	
Hermes 450	ES	1994	6,1	10,5	6,1	200	38,2	176	450	14,0	150	5
Blue Horizon	EMIT	1995	3,2	6,0	5,5		18,4	209	150	16,0	37	1
Hunter	IAI	1995	6,9	10,5	6,1	200	41,2	222	885	21,0	100	8,3
Searcher II	IAI	1998	5,9	8,6	7,0	250	34,8	200	436	18,0	120	2,8
Blue Horizon II	EMIT	1999	3,2	6,5	6,1	300	н.д.	220	180	16,0	37	н.д.
Hermes 180	ES	2002	4,4	6,0	4,6	150	28,3	194	195	10,0	32	3
Searcher MK III	IAI	2010	5,9	8,6	7,0	350	53,7	203,72	450	18	120	н.д.

Источники: [7, 14–16].

БПЛА класса MR применяются для разведки, осуществления поисковых операций, обнаружения скрытых позиций противника, регулировки и управления огнем, оценки

ситуации на земле и др. Современные БПЛА этого класса в основном имеют модульную конструкцию, что позволяет монтировать различные виды дополнительного оборудования (радиолокационное оборудование, различные камеры для наблюдения, дальнометры и др.), обеспечивая универсальность беспилотников.

Проведенный анализ показывает, что для БПЛА этого класса характерно увеличение дальности полетов и мощности двигателей аппаратов (рис. 5).

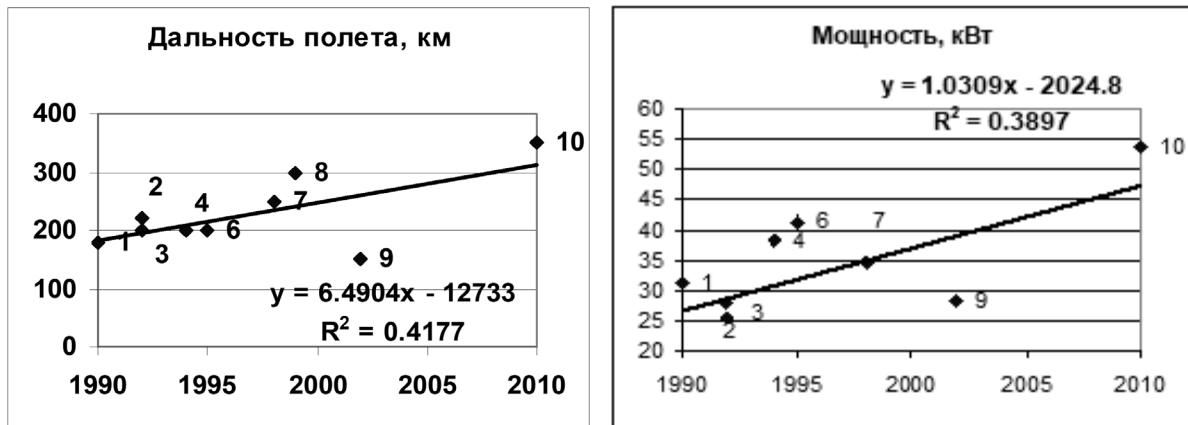


Рис. 5. Изменение максимальной дальности полета и мощности двигателя БПЛА класса MR, 1990–2010 гг.

Источник: авторская разработка по данным [7, 14–16].

Кроме того, происходит снижение удельных затрат мощности на 1 кг максимальной взлетной массы и 1 кг полезной нагрузки с ростом взлетной массы и полезной нагрузки соответственно (рис. 6).

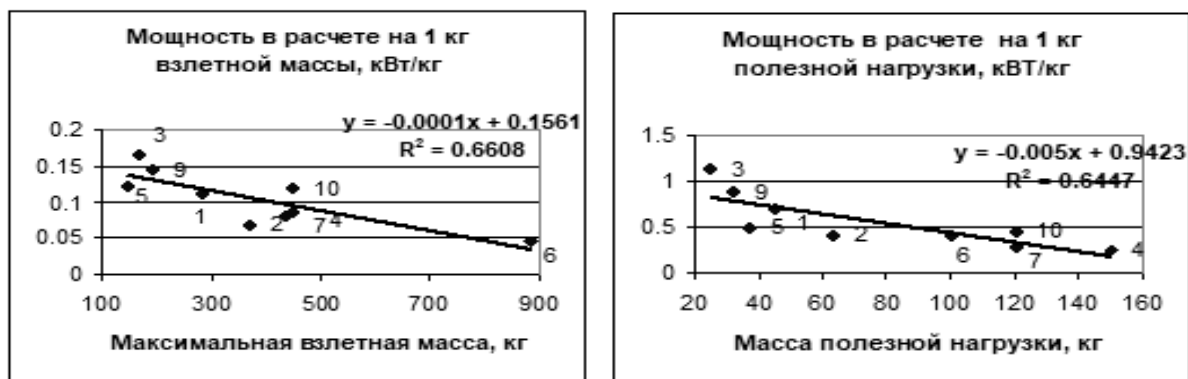


Рис. 6. Зависимость удельной мощности двигателя БПЛА класса MR от соответствующего показателя

Источник: авторская разработка по данным [7, 14–16].

Анализ стоимостных показателей свидетельствует о снижении цены 1 кг максимальной взлетной массы и полезной нагрузки с ростом этих показателей (рис. 7).

При анализе динамики основных и вспомогательных параметров БПЛА класса MR по поколениям были выделены следующие группы: 1 поколение – Ranger, Searcher I и Sniper, 2 поколение – Hermes-450, Blue Horizon и Hunter, 3 поколение – Searcher II, Blue Horizon II и Hermes 180, 4 поколение – Searcher МК. III. Оценка средних технических

показателей по поколениям выявила тенденцию роста дальности полетов, отношения массы полезной нагрузки к максимальной взлетной, мощности и цены 1 кг максимальной взлетной массы (рис. 8).

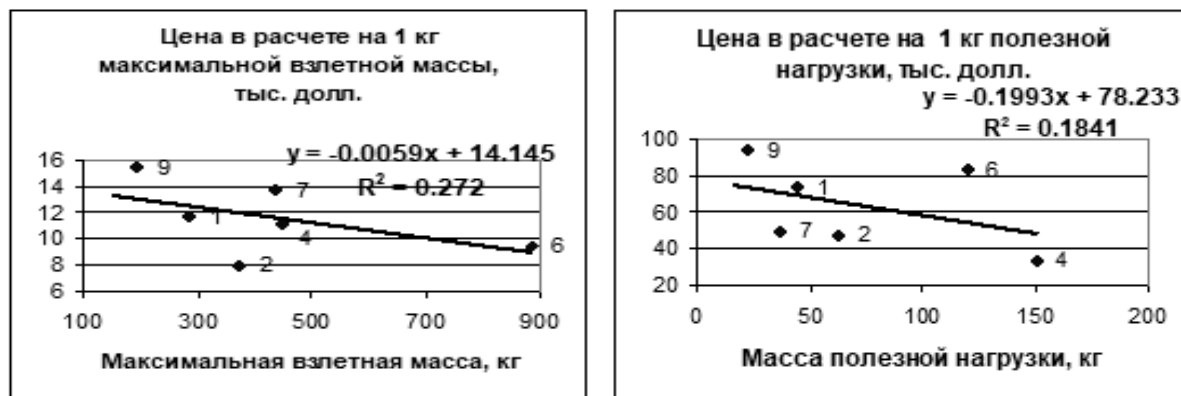


Рис. 7. Изменение удельной цены БПЛА класса MR от соответствующего показателя

Источник: авторская разработка по данным [7, 14–16].

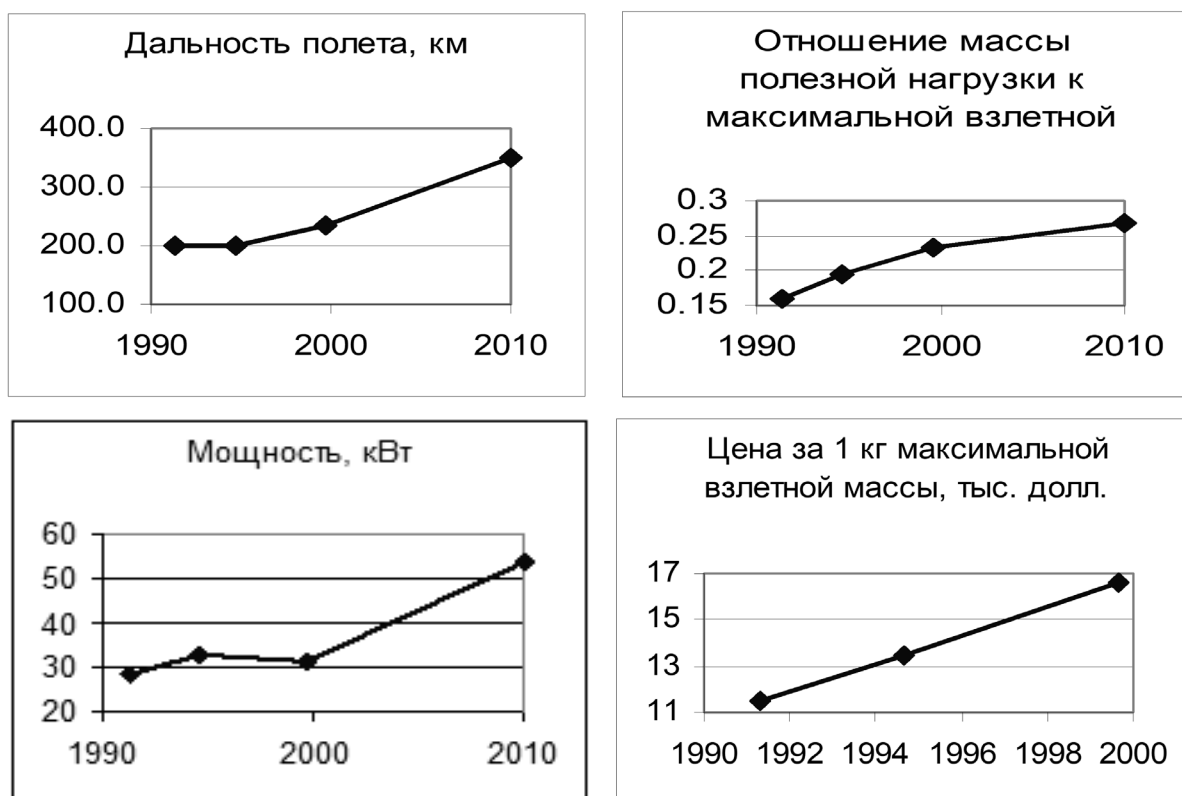


Рис. 8. Изменение средних по поколениям технических характеристик БПЛА класса MR

Источник: авторская разработка по данным [7, 14–16].

Развитие технологий БПЛА среднего радиуса действия идет по разным направлениям. Так, например, БПЛА компании EMIT Blue Horizon 2 выполнен с использованием технологии «стелс», что делает его практически невидимым для радиолокационного оборудования. Однако управление им требует большой стационарной станции, поэтому развертывание аппарата может занять много времени. Searcher Mk III оборудован двигателем

с низким уровнем шума, для корпуса аппарата использованы композитные материалы, которые снижают возможность обнаружения его радаром. Кроме того, предусмотрены две одновременные системы автономного взлета и посадки (ATOL) и резервная авионика для обеспечения максимальной безопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Израильские производители беспилотных авиационных систем вкладывают огромные средства в разработку БПЛА для сохранения своего преимущества перед конкурентами. Часть средств направляется на улучшение возможностей БПЛА, состоящих на вооружении израильской армии, другие вкладываются в разработку БПЛА для поставок на экспорт и в увеличение объема продаж. Так, на Aero India show в Бангалоре в феврале 2017 г. был представлен экспортный вариант нового БПЛА класса MALE – Heron TP-XP, который разработан с учетом требований Missile Technology Control Regime (MTCR) по ограничению распространения ракетных технологий. Он имеет те же характеристики, что и Heron TP, состоящий на вооружении ВВС Израиля, но несет меньшую полезную нагрузку – 450 кг. За период 2017–2020 гг. на этот БПЛА поступили заказы из Германии, Индии и других стран. Еще один аппарат класса MALE (Hermes 900 StarLine) производства компании Elbit Systems предназначен для работы в гражданском воздушном пространстве. Он полностью соответствует Соглашению о стандартизации НАТО (Stanag 4671), оснащен системами предупреждения столкновения с другими судами и с землей, системой автоматических взлета и посадки при нулевой видимости, имеет дизельный двигатель, способен летать при плохих погодных условиях и низких температурах [17]. Разработка Hermes 900 StarLine велась по заказу Министерства обороны Швейцарии, был заключен контракт на поставку 6 БПЛА. Один Hermes 900 StarLine в 2020 г. был куплен Канадой для мониторинга окружающей среды [18].

Для новых поколений БПЛА продолжают развиваться и совершенствоваться авионика, системы связи и обработки информации, мультисенсорные возможности, средства радиоэлектронной борьбы и другие системы.

Анализируя изменение технико-экономических показателей БПЛА Израиля двух классов (MALE и MR), следует отметить, что для них одинаково характерно снижение цены и удельной мощности в расчете на единицу массы (максимальной взлетной массы и массы полезной нагрузки) с ростом массы. Для аппаратов двух классов по поколениям отмечается рост мощности двигателя, при этом совершенствование аппаратов класса MALE направлено на повышение продолжительности полета, класса MR – его дальности. Для класса MALE характерен рост цены БПЛА в расчете на 1 кг полезной нагрузки, для класса MR – цены в расчете на 1 кг максимальной взлетной массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варшавский А.Е., Дымова И.А. Проблемы развития рынка роботизированных технологий // Математика. Компьютер. Образование: Сб. научн. трудов (выпуск 17). № 2. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. С. 43–49.

2. Global Drone Trade URL: <http://ceoworld.biz/2015/03/16/global-drone-trade-worlds-largest-importing-and-exporting-countries> (дата обращения: 24.08.2022).
3. Israel Homeland Security URL: <http://i-hls.com/2013/05/frost-sullivan-israel-is-the-worlds-largest-exporter-of-unmanned-aircraft/> (дата обращения: 23.12.2021).
4. Дубинина М.Г., Дубинин В.В. Беспилотные летательные аппараты Китая // Анализ и моделирование экономических и социальных процессов / Математика. Компьютер. Образование: Сб. научн. трудов (выпуск 21). № 2. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2014. С. 83–90.
5. Van Blyenburgh P. UAVs: An Overview // Air & Space Europe. 1999. Vol. 1. No. 5/6. Pp. 43–47.
6. RPAS 2015 Yearbook – RPAS: The Global Perspective – 13th Annual Edition – June 2015 – Blyenburgh & Co. 252 p. URL: <http://rps-info.com/> (дата обращения: 24.12.2021).
7. Israel Aerospace Industries. URL: <https://www.iai.co.il/iai-publishes-its-annual-financial-statements-2020> (дата обращения: 17.05.2022).
8. Transfers of major conventional weapons: sorted by supplier. Deals with deliveries or orders made for year range 1985 to 2020. SIPRI Arms Transfers Database. 03 February 2022. URL: https://armstrade.sipri.org/armstrade/page/trade_register.php (дата обращения: 03.02.2022).
9. Варшавский А.Е. Научно-технический прогресс в моделях экономического развития. Методы анализа и оценки. М., Финансы и статистика, 1984. 208 с.
10. Мартино Дж. Технологическое прогнозирование. М.: Прогресс, 1977. 591 с.
11. RPAS Yearbook 2018 – The Global Perspective – Edition 2018 – Blyenburgh & Co. 292 p. URL: https://rps-info.com/publications_old-page/rpas-yearbook-2018 (дата обращения: 24.09.2022).
12. Aeronautics. URL: <http://aeronautics-sys.com/home-page/page-systems/page-systems-dominator-хр-male-us/> (дата обращения: 24.12.2021).
13. IAI to introduce Heron TP-XP MALE UAV at Aero India 2017 URL: <http://www.airforce-technology.com/news/newsiai-to-introduce-heron-tp-хр-male-uav-at-aero-india-2017-5739225> (дата обращения: 24.12.2021).
14. Israel Aerospace Industries URL: http://www.iai.co.il/2013/18900-16382-en/BusinessAreas_UnmannedAirSystems_HeronFamily.aspx (дата обращения: 24.12.2021).
15. Elbit Systems. URL: <http://elbitsystems.com/products/uas/> (дата обращения: 24.12.2021).
16. Unmanned Vehicles handbook 2008. The Shephard Press Ltd. 2008. 72 p.
17. Elbit Systems Hermes 900 StarLiner. URL: <https://www.uasvision.com/2020/07/03/elbit-systems-hermes-900-starliner/> (дата обращения: 03.02.2022).
18. В Канаде беспилотник будет проводить экологический мониторинг. URL: <https://strelkamag.com/ru/news/v-kanade-bespilotnik-budet-sledit-za-ekologicheskoi-obstanovkoi> (дата обращения: 03.02.2022).

ГЛАВА 9.

АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БПЛА ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ (на примере БПЛА в странах ЕС)

ВВЕДЕНИЕ

Производство и использование коммерческих и гражданских беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в последние годы становится объектом повышенного внимания широкой общественности. Ускоренное развитие технологий БПЛА, разработка многочисленных приложений и расширение спектра услуг, которые они могут предоставить, свидетельствуют о высоком потенциале этого рынка, несмотря на то что в настоящее время он находится на ранней стадии своего развития.

Согласно отчету компании Inea Consulting [1], в 2013 г. мировые вложения в гражданские и коммерческие БПЛА оценивались в 509 млн евро, а на мировом рынке БПЛА доля США составляла 61%, стран Азиатского и Тихоокеанского региона – 20%, стран Европы – 17% и прочих стран – 2%. Оценивая потенциал этого рынка в 2015 г., аналитики компании Teal Group указывали, что 72% в нем приходится на долю военных БПЛА, 23% – коммерческих и 5% – гражданских, и из этих трех групп рынок гражданских БПЛА является самым быстро растущим [2]. А компания BI-Intelligent оценила среднегодовые темпы роста рынка гражданских и коммерческих БПЛА в 19% за 2015–2020 гг., тогда как для военных БПЛА этот показатель, по оценкам, составит 5% [3]. По данным компании Business Insider, продажи коммерческих дронов в 2021 г. составят 805 тыс. ед. [4].

Глава подготовлена на основе статьи автора*.

СТРУКТУРА ПРОИЗВОДИМЫХ ГРАЖДАНСКИХ БПЛА В СТРАНАХ ЕС

В странах ЕС принято называть гражданские БПЛА *remotely piloted aircraft systems (RPAS)*, понимая под этим самолетные системы, контролируемые на расстоянии оператором, который может непосредственно вмешиваться в управление полетом [5]. Важность использования RPAS в Европе связана с тем, что они предлагают новые виды услуг, выходящие за рамки традиционной авиации, при этом более доступными экологически безопасным способом. RPAS становятся все более популярными для воздушного наблюдения; видео- и фотосъемки.

Согласно отчету ЕС [6], распределение потребительского спроса на гражданские БПЛА в период с 2015 по 2020 г. предполагается следующим: 45% аппаратов будет использоваться правительственными структурами, 25% – пожарными, 13% – в сельском хозяйстве и лесничестве, 10% – в энергетике, 6% – в обзоре земной поверхности, 1% – для связи и вещания.

* Дубинина М.Г. Анализ технико-экономических показателей БПЛА гражданского назначения в странах ЕС // Анализ и моделирование экономических и социальных процессов / Математика. Компьютер. Образование: Сб. научн. трудов (выпуск 23). № 2. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2016.

По своим размерам гражданские БПЛА могут быть классифицированы по следующим категориям [7]: микро-мини (весом до 7 кг, оперативная высота до 125 м, могут применяться в помещениях); мини-малые (весом 8–400 кг, оперативная высота от 100 до 1250 м, дальность около 500 м); вертолетного типа (БПЛА с вертикальным взлетом и посадкой; БПЛА вертолетного типа могут быть либо с одним простым винтом, либо с коаксиальным винтом); MALE (вес от 400 до 4000 кг, высота полета 4,5–13,8 км, дальность около 500 км, снабжены датчиками, могут заменить управляемые самолеты той же конфигурации); HALE (высота полета более 13,8 км).

В 2015 г. в мире насчитывалось 2125 различных моделей БПЛА (из них 564 в Европе), созданных 637 производителями во всем мире, из которых около 200 – европейские. В 2021 г. количество разрабатываемых моделей в мире несколько сократилось (до 1978 моделей, из них 566 – европейские, 104 – российские). Среди разрабатываемых и производимых в странах ЕС RPAS за период 2010–2015 гг. существенно выросла доля гражданских и коммерческих аппаратов (с 21,1% в 2010 г. до 41,1% в 2015 г.), несколько выросла доля аппаратов двойного назначения (с 24,3 до 26,8% соответственно) при значительном снижении доли военных PRAS (с 28,8 до 18,3% соответственно, табл. 1). В 2018 г. тенденция роста количества моделей гражданских и коммерческих БПЛА в Европе продолжилась, их доля составила более 54% при сокращении доли военных БПЛА до 12,3%. На долю европейских стран в 2015 г. приходилось почти 57% всех гражданских PRAS в мире и более 30% аппаратов двойного назначения. Основными видами используемых в европейских странах RPAS являются микро- и мини-RPAS (40,5 и 33,4% соответственно по данным 2018 г.) [8]. Основными производителями RPAS были средние и малые предприятия (272 разработчика) и компании с численностью занятых более 250 человек (71 компания) [9].

Таблица 1

Структура и темп роста числа моделей RPAS, производимых и разрабатываемых в странах Европы

Область применения	Структура по видам RPAS, %			Темп роста числа моделей RPAS, %,	
	2010	2015	2018	2015 к 2010 г.	2018 к 2015 г.
Гражданское/коммерческое использование	21,1	41,1	54,3	223,1	134,5
Военное применение	28,8	18,3	12,3	72,5	68,9
RPAS двойного назначения	24,3	26,8	23,5	125,8	89,4
Исследовательские RPAS	2,4	4,8	3,1	225,0	66,7
Разрабатываемые RPAS	23,3	9,0	6,8	44,3	76,5

Источник: авторская разработка по данным [10].

ИНТЕГРАЦИЯ ГРАЖДАНСКИХ RPAS В ВОЗДУШНОЕ ПРОСТРАНСТВО

Главная проблема в использовании RPAS в настоящее время – это то, что они могут совершать полеты только в специально отведенном воздушном пространстве, что связано с требованиями безопасности полетов. Для интеграции RPAS в гражданское воздушное пространство ЕС предпринимались соответствующие шаги. Сложность заключалась в том, что правила ЕС относили RPAS с максимальной взлетной массой (MTOW) выше 150 кг к юрисдикции Европейского агентства по авиационной безопасности (EASA), а RPAS с

MTOW ниже 150 кг – гражданской авиационной ассоциации (CAA). Однако такое разграничение должно предусматривать согласованность правил использования RPAS с любой MTOW.

В 2013 г. была принята Дорожная карта по интеграции гражданских RPAS в Европейскую авиационную систему, которая предусматривает целый ряд мероприятий и этапов, в результате которых к 2024–2028 гг. RPAS будут действовать наравне с пилотируемой авиацией по единым правилам и с обеспечением такого же уровня безопасности. Европейское агентство по авиационной безопасности (EASA) разработало «Концепцию эксплуатации RPAS». В ней предполагается все беспилотники, предназначенные для коммерческих или гражданских целей, разделить на три категории: открытые (Open), особые (Specific) и сертифицированные (Certified). Эти категории должны учитывать разницу между RPAS по сложности управления, назначению, высоте эксплуатации и т.д.

К открытым RPAS предполагается отнести беспилотники с высотой полета до 150 м. Для них не будет требоваться разрешений авиационных властей на эксплуатацию, но полеты не должны производиться вблизи от аэропортов и мест проживания людей. Для использования особых RPAS необходимо будет получить разрешение авиационных властей, которые оценят безопасность полета с учетом летной годности, особенностей использования аппарата, компетентности персонала и др. Сертифицированные RPAS – RPAS массой более 150 кг, которые могут выполнять полеты в неограниченном воздушном пространстве. Операторы подобных беспилотников должны будут обладать специальной лицензией, а на сам RPAS нужно будет получить индивидуальный сертификат летной годности и сертификат по шуму.

РЫНОК ГРАЖДАНСКИХ RPAS В СТРАНАХ ЕС

Согласно отчету, подготовленному компанией Frost и Sullivan [11], рынок гражданских и коммерческих RPAS в Европе оценивался в 1 млрд евро в период 2006–2015 гг., при этом, как ожидалось, он должен вырасти с 8,4 млн в 2006 до 270,4 млн евро в 2015 г. Большая часть таких RPAS используется для дистанционного зондирования Земли (37%), обеспечения связи (13%), контроля границ (11%), прибрежного патрулирования (13%), борьбы с лесными пожарами (12%). На долю остальных видов приходится 11–14%.

Общее число гражданских RPAS, производимых или разрабатываемых в странах Европы, увеличилось с 95 ед. в 2007 г. до 312 ед. в 2018 г., большая часть из них производилась в ведущих европейских странах (табл. 2). За период 2012–2018 гг. существенно выросла доля Франции в производимых и разрабатываемых гражданских RPAS в Европе (с 14,3% в 2012 г. до 26,6% в 2018 г.), что связано с покупкой французской компанией Parrot швейцарской SenseFly, производящей коммерческие сверхлегкие беспилотники для картографирования и наблюдений в сельском хозяйстве, мониторинга инфраструктуры и т.д. Необходимо отметить, что некоторые страны (например, Швеция) не производят чисто гражданских и коммерческих RPAS, но большая часть их аппаратов имеет двойное назначение.

Таблица 2

Структура производства и разработок моделей гражданских и коммерческих RPAS
в европейских странах, %

Страна	2007	2010	2012	2015	2018
Франция	25,3	15,4	14,3	28,0	26,6
Германия	10,5	15,4	21,1	17,7	14,4
Италия	7,4	13,5	10,5	10,8	14,4
Испания	4,2	14,4	13,5	8,2	4,5
Швейцария	7,4	13,5	7,5	7,8	5,1
Великобритания	14,7	4,8	12,0	7,3	7,4
Нидерланды	6,3	6,7	9,0	6,0	3,5
Прочие европейские страны	24,2	16,3	12,1	14,2	24,0
Всего	100	100	100	100	100

Источник: авторская разработка по данным [8, 10].

Особое место на европейском рынке гражданских RPAS занимает Франция, где в 2019 г. в этом секторе работало около 8,5 тыс. человек, в основном в средних, малых и микропредприятиях [12]. Выручка оценивалась в размере 50–100 млн евро, а среднегодовой рост составлял 25–30%. Организация, объединяющая в стране профессионалов в области гражданского использования RPAS, включает 300 зарегистрированных участников, из которых 57% – операторы RPAS, 6% – производители, 10% – летные школы, 4% – продавцы и 23% – прочие, в том числе занимающиеся НИОКР в этой области.

Франция первой открыла свое воздушное пространство для беспилотных летательных аппаратов. Основными производителями коммерческих и гражданских RPAS во Франции являются компании Parrot, Lehmann Aviation и Delta Drone. После покупки компании SenseFly, доля сегмента дронов в общем выпуске компании Parrot выросла с 15,1% в 2012 г. до 54% в 2020 г. При этом большая часть продаваемых компанией дронов приходится на розничные (85% выпуска сегмента в 2014 г.), однако доля коммерческих в продажах сегмента выросла с 1% в 2012 г. до 15% в 2014 г. За 2014 г. компания вывела на рынок по 3 новые модели розничных и коммерческих RPAS. В 2019 г. была выпущена модель Anafi, а в 2021 г. эта модель стала первым беспилотником, использующим сети 4G в качестве основного канала передачи данных между дроном и оператором.

В 2020 г. во Франции 25% гражданских БПЛА использовались СМИ и для аэро съемки, по 20% – в строительстве и инспекции гражданской инфраструктуры, а также для спасательных работ, по 15% – в сельском хозяйстве и при добыче полезных ископаемых [13].

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГРАЖДАНСКИХ RPAS

По принципу полета RPAS могут быть классифицированы по 5 основным группам [14]: на аппараты с жестким крылом (самолетного типа); с гибким крылом; с вращающимся крылом (вертолетного типа); с машущим крылом; аэростатического типа.

RPAS самолетного типа, в свою очередь, бывают фюзеляжными и сделанными по принципу «летающего крыла». Аппараты вертолетного типа бывают с одним ротором или с несколькими (мультикоптеры). Все эти виды RPAS могут найти применение в гражданских целях. Если в целом большая часть моделей в европейских странах представляла собой

аппараты с фиксированным крылом (самолетного типа, 51,9% в 2014 г.), то среди гражданских, коммерческих RPAS и аппаратов двойного назначения в последнее время стали преобладать аппараты вертолетного типа (в 2012 г. их доля возросла до 42,7%, в 2018 г. – до 61,1%, при этом доля RPAS самолетного типа составила 41,4% в 2012 г. и сократилась до 26% в 2018 г., табл. 3).

Таблица 3

Структура производимых и разрабатываемых RPAS гражданского и двойного назначения в странах Европы по принципу полета, %

Тип крыла	2004	2006	2007	2008	2010	2012	2015	2018
Машущее крыло	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	1,3	4,2
Фиксированное крыло	35,0	35,0	42,7	45,3	45,3	41,4	23,1	26,0
Аэростаты	5,0	7,5	11,5	9,4	7,2	5,7	4,6	0,6
Мотопарапланы	10,0	7,5	3,1	3,8	4,0	3,1	1,7	0,3
Вращающееся крыло	50,0	50,0	34,4	39,6	35,9	42,7	68,5	61,1
Закрытый винт	0,0	0,0	3,1	1,9	7,2	5,3	0,0	2,5
Прочие	0,0	0,0	4,2	0,0	0,4	0,4	...	0,9
Всего	100	100	100	100	100	100	100	100

Источник: авторская разработка по данным [15].

Согласно приведенной ранее классификации RPAS по максимальному взлетному весу и продолжительности полета, в структуре производимых и разрабатываемых в европейских странах беспилотников большую часть составляют мини и микро RPAS (33,6% и 32,5% в 2021 г. соответственно). Это объясняется относительной дешевизной их производства и возможностью использования для решения широкого круга задач в гражданской сфере. Развитию рынка такого класса RPAS способствовало появление новых технологий в потребительской электронике, создание миниатюрных камер, позволяющих производить высококачественную фото- и видеосъемку, разработка легких и емких компактных аккумуляторов и др.

Предполагается, что в будущем для мини- и микро-RPAS будет в большей степени использоваться схема мультикоптера. В отличие от вертолетного типа традиционной схемы с несущим и рулевым винтами, такая конструкция обладает большей стабильностью и устойчивостью в полете, управляемостью и маневренностью на низких скоростях. Аппараты этого типа имеют относительно большую массу полезной нагрузки при малой максимальной взлетной массе. Однако и у нее имеются свои недостатки. Считается, что лучшей устойчивостью к ветру обладают относительно тяжелые RPAS с большим числом винтов (например, гексакоптеры) [16].

Среди европейских производителей микро и мини RPAS особое место занимает французская компания Lehmann Aviation. Для разрабатываемых моделей компания использует тип «летающего крыла», модели относятся к классу микро-БПЛА и предназначены для профессионального использования в сельском хозяйстве, разведке, научных исследованиях, для видеонаблюдения за объектами в дневное и ночное время (табл. 4).

У всех моделей длина составляет 45 см, размах крыла – 92 см (у LA500 – 116 см), максимальная скорость – 80 км/ч. Если у первой модели компании (LP960) отсутствовали автопилот и автонавигация, то, начиная с LM450 все модели компании могут работать в полностью автоматическом режиме. Серия LA управляется с помощью планшета или ПК,

а новая модификация модели LA100 – с iPhone. Стоимость моделей гораздо ниже, чем продукции других фирм, – например, стоимости беспилотных вертолетов фирмы Yamaha (до 230 тыс. долл., [18]).

Таблица 4

Техническо-экономические характеристики моделей RPAS компании Lehmann Aviation

Название	LP960	LV580	LM450	LA100	LA200	LA300	LA500	LM500	LA100-2
Год	2007	2009	2010	2012	2013	2013	2016	2013	2014
Масса, кг	1,25	1,25	0,95	0,25	0,9	0,95	1,25	0,95	0,85
Высота, км	1,5	0,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Дальность, км	5	5	5	0,15	3	25	25	5	0,3
Продолжительность полета, ч	0,42	0,5	н.д.	0,04	0,75	0,75	0,75	0,75	н.д.
Полезная нагрузка, кг	0,35	н.д.	0,15	0,15	0,15	0,2	н.д.	0,15	0,15
Цена, евро	7990	14990	4490	1320	1890	2890	3490	5990	990

Источник: [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большое внимание, которое уделяется в странах ЕС разработке норм и правил для интеграции RPAS в европейское воздушное пространство, свидетельствует о потенциале этого сегмента рынка и способствует его развитию. Конструкция многих беспилотных аппаратов позволяет настраивать базовую систему, оснащая ее различной полезной нагрузкой для разного рода задач.

Целый ряд отраслей промышленности могут в будущем использовать гражданские RPAS. Расширение использования бортовых систем видеонаблюдения позволит применять беспилотники для охраны и безопасности на различных мероприятиях и в сложных ситуациях. С их помощью предполагается создавать временные линии связи и обеспечивать интернетом отдаленные от коммуникаций районы, доставлять грузы, заказы и посылки, военную технику, лекарства и др. в спасательных работах, проводить мониторинг окружающей среды и предоставлять многие другие виды услуг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global Commercial and Civil UAV Market Guide 2014–2015. Inea Consult ing. 2014. URL: <https://ineaconsulting.eu/en/news-en/24-03-2015-global-commercial-and-civil-uav-market-guide-2014-2015-drones-in-renewable-energy-sector> (дата обращения: 27.12.2021).
2. Teal Group Corporation Press Release. URL: <https://www.tealgroup.com/index.php/pages/press-releases/34-uav-production-will-total-93-billion> (дата обращения: 27.12.2021).
3. Business Insider. The Drones Report. URL: <http://www.businessinsider.com/uav-or-commercial-drone-market-forecast-2015-2#ixzz3XxVeSzoc> (дата обращения: 27.12.2021).
4. Commercial Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market Analysis – Industry trends, forecasts and companies. URL: <https://www.businessinsider.com/commercial-uav-market-analysis> (дата обращения: 27.12.2021).
5. Civilian Use of Drones in the EU. – House of Lords European Union Committee, 7th Report of Session 2014-15. URL: <https://publications.parliament.uk/pa/ld201415/ldselect/lducom/122/122.pdf> (дата обращения: 27.12.2021).
6. Study Analysing the Current Activities in the Field of UAV. Frost & Sullivan. ENTR/2007/065. URL: <https://online.fliphtml5.com/fpkv/jmvp/#p=1> (дата обращения: 27.12.2021).

7. European Civil Unmanned Air Vehicle Roadmap. – Strategic Research Agenda. 2005. URL: https://elib.dlr.de/44544/1/UAV_Roadmap_Overview33.pdf (дата обращения: 27.12.2021).
8. RPAS Yearbook 2018. URL: https://rps-info.com/publications_old-page/rpas-yearbook-2018/ (дата обращения: 27.12.2021).
9. 2011–2012 UAS Yearbook – UAS: The Global Perspective – 9th Edition – June 2011 – Blyenburgh & Co. 216 p.
10. RPAS Yearbook 2015, 2018. – RPAS: The Global Perspective – 13th Annual Edition – June 2015 – Blyenburgh & Co. 252 p.
11. Study Analysing the Current Activities in the Field of UAV. – Frost & Sullivan. ENTR/2007/065.
12. France Professional Civil-Use Drones. URL: <https://www.trade.gov/market-intelligence/france-professional-civil-use-drones> (дата обращения: 27.12.2021).
13. Breakdown of considered usages of civilian drones in France by 2020. URL: <https://www.statista.com/statistics/1074962/use-civilian-drones-connected-uav-objects-france/> (дата обращения: 27.12.2021).
14. Фетисов В.С., Неугодникова Л.М., Адамовский В.В., Красноперов Р.А. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние / под ред. В. С. Фетисова. Уфа: ФОТОН, 2014. –17 с.: ил.
15. RPAS Yearbook 2014–2018. Blyenburgh & Co. URL: <https://rps-info.com/publications/> (дата обращения: 28.12.2021).
16. Ерохин Е., Коломиец А. Мультикоптеры: новый вид. Беспилотная авиация. URL: <http://ufology-news.com/u/39779988/ufology-news/files/multicopters.pdf> (дата обращения: 28.12.2021).
17. Lehmann Aviation URL: <http://www.lehmannaviation.com/> (дата обращения: 28.12.2021).
18. Варшавский А.Е. Основные тенденции и показатели развития робототехники // Концепции. 2015. № 1 (33). С. 16–25.

ГЛАВА 10. НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКИХ И СТРАТОСФЕРНЫХ БПЛА

ВВЕДЕНИЕ

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) повсеместно используются во всем мире для решения широкого круга задач, как военных, так и гражданских. В настоящее время ряд стран проводит исследования и разрабатывает собственные космические БПЛА (Unmanned space vehicles, USV). Глава подготовлена на основе статьи*.

ВОЕННЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ БПЛА

В специальном отчете министерства обороны США «The 2014 Quadrennial Defense Review» [1] указывалось, что космос является жизненно важным для безопасности США и требует использования всех возможностей разведки, наблюдения и вмешательства, которые могут быть обеспечены с помощью спутников и беспилотных авиационных систем. Именно поэтому в последнее время активизировались работы в области создания космических БПЛА.

Одна из разработок беспилотного космического корабля принадлежит американской компании Boeing. Проект был запущен в 1999 г. под совместной разработкой NASA и Boeing. На проект было выделено 173 млн долл. Первоначально предполагалось, что аппарат будет использоваться для доставки на орбиту небольших спутников и грузов. В результате в 2003 г. было проведено наземное испытание X-37A для отработки маневрирования и посадки. В 2002 г. Boeing получил еще 301 млн долл. на разработку орбитальной версии аппарата, который должен был быть запущен на орбиту в 2006 г. Но в 2004 г. проект из NASA перешел в ведение DARPA [2].

В 2006 г. были проведены тестовые сбрасывания аппарата, а первые летные испытания космический аппарат X-37B прошел в 2010 г. В декабре 2012 г. этот аппарат был вновь выведен на орбиту и провёл в космосе почти 2 года, благополучно приземлившись на Землю в октябре 2014 г. После этого было произведено еще 4 запуска. Шестая миссия X-37B стартовала 17 мая 2020 г. и продолжается до настоящего времени.

Аппарат работает от солнечных батарей, но имеет также топливные баки и реактивный двигатель, что позволяет ему совершать маневры на орбите. Первоначально X-37B создавался для разведывательных целей, но в итоге оказался универсальным. Он может выполнять функции космического перехватчика, выводить на орбиту спутники и доставлять вооружение. По оценкам российских специалистов такой аппарат может нести до 6 ядерных боеголовок [3]. Аппарат снабжен теплозащитным экраном, что позволяет ему несколько раз проходить через атмосферу Земли.

* Дубинина М.Г., Дубинин В.В. Направления развития космических и стратосферных БПЛА // Анализ и моделирование экономических и социальных процессов / Математика. Компьютер. Образование: Сб. научн. трудов (выпуск 22). № 2. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2015. С. 75–82.

Кроме того, в планах США – создание многоразового гиперзвукового космического беспилотника под обозначением XS-1. Перед разработчиками была поставлена задача выполнить ряд обязательных требований к проекту. Этот аппарат должен нести полезную нагрузку до 2,27 т, выдерживать серию ежедневных запусков в течение 10 дней подряд, при этом не нуждаясь в ремонте и дополнительном техническом обслуживании. Стоимость его запуска не должна быть дороже 5 млн долл. К проекту привлечены несколько компаний (XCOR, Blue Origin и Virgin Galactic), каждая должна разработать собственный вариант аппарата. На основе этих разработок будет создан первый прототип [4].

Для разрабатываемого космического корабля предполагается создать систему удаленного управления автоматическим режимом его сближения и стыковки с другими космическими аппаратами, оснастить корабль космической навигационной системой для контроля точности посадки аппарата, а также системой предотвращения аварийных ситуаций [5].

БЕСПИЛОТНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЧЕЛНОКИ

Китай следом за США приступил к созданию беспилотного космического челнока Shenlong и уже в 2007 г. провел тестовые наземные испытания этого космического аппарата. В 2012 г. в ряде СМИ появилось сообщение о первых летных испытаниях Shenlong. Если ранее отставание Китая в авиакосмических разработках составляло более 10 лет, то в настоящее время разрыв существенно сократился и в области военного космического БПЛА составил всего 1 год [6].

Созданием космического БПЛА занимаются и европейские страны. Так, Италия в 2007 г. провела испытания исследовательского аппарата Castor, разработанного Центром аэрокосмических исследований (Center for Aerospace Research, CIRA). Аппарат был поднят аэростатом на высоту в 21 км, после чего в свободном падении развил скорость около 1300 км/ч, однако при приземлении он получил значительные повреждения из-за сбоя в парашютной системе. Следующий образец CIRA, названный Polluce, совершил удачный полет в 2010 г. Он был поднят на высоту 24 км, откуда перешел в фазу свободного падения, развил скорость около 1500 км/ч и благополучно приводнился. Эти аппараты являются прототипами для отработки технологии мягкой посадки для космических челноков. Проект был рассчитан до 2012 г. и оценивался в 179 млн евро [7].

В 2014 г. был осуществлен запуск первого европейского суборбитального БПЛА IXV (Intermediate eXperimental Vehicle – Промежуточный экспериментальный аппарат). В ходе полета, продолжавшегося всего 100 минут, аппарат поднялся на высоту 412 км и затем приземлился с помощью парашюта в Тихом океане. Важность проекта состоит в его исключительно мирных целях. Раньше подобные миссии проводились только в рамках военных программ [8]. IXV является совместным проектом программы подготовки будущих стартов ESA, французского космического агентства CNES и компании Arianespace. Стоимость проекта, продолжавшегося 5 лет, оценивается в 150 млн евро. Аппарат считается прототипом космического челнока, который сможет, как обычный самолет, приземляться на взлетно-посадочную полосу [9].

Возможность использования космических беспилотных аппаратов несколько раз определяет ряд их преимуществ перед обычными пусковыми установками. Полезные

нагрузки таких аппаратов могут быть изменены между задачами, а их универсальность дает некоторую экономию, особенно для разведывательных целей. Стоимость ракетных ускорителей для вывода космического самолета на орбиту оценивается в 150–200 млн долл. [6].

В табл. 1 приведены технические характеристики некоторых космических БПЛА.

Таблица 1

Беспилотные космические летательные аппараты

Космические БПЛА	X-37B	XS-1 Phantom Express	Skylon	Shenlong	ScramSpace
Страна	США	США	ЕС, Великобритания	Китай	Австралия
Производитель	Boeing	DARPA	Reaction Engines Limited	Chinese Academy of Launcher Technology	The University of Queensland
Длина, м	8,9	19,5	83,3	5,8	1,8
Размах крыла, м	4,5	13	25,4	н.д.	н.д.
Взлетная масса, кг	4989	н.д.	275 000	13 000	н.д.
Масса полезного груза, кг	900	2270	12000	н.д.	н.д.
Первый полет	2010	2018	2019	2007 – тест	2013 – закончился неудачей
Скорость, км/ч	28 044	11 500	6593	н.д.	8600
Тяга, кН	н.д.	н.д.	2700	н.д.	н.д.
Стоимость разработки, млн долл.	474	27	12000	н.д.	14

Источник: [6, 10–13].

БЕСПИЛОТНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДРУГИХ ПЛАНЕТ

Космические программы ряда стран нацелены на исследования различных планет. Для осуществления поставленных целей необходимы космические аппараты, способные достигнуть этих планет, а также провести на них исследования, разведку, передать на Землю важные сведения. Ученые предлагают использовать для миссий на планетах БПЛА.

Для исследования и изучения Титана, фотографирования поверхности этого спутника Сатурна создан космический беспилотник Aviatr, разработка которого финансируется NASA. Предполагается, что аппарат сможет достаточно долгое время находиться над поверхностью спутника, а в конце своей миссии приземлится на его поверхность. Стоимость самого аппарата и его доставки на орбиту оценивается в 715 млн долл., а старт миссии был запланирован на 2017 г. [14].

В октябре 2014 г. был запущен китайский космический БПЛА, который провел тестовые маневры на орбите Луны. Через 8 дней после начала полета на Землю вернулась возвращаемая капсула, а служебный модуль оставался на орбите до февраля 2015 г. Полет состоял из трех этапов с разной скоростью, конфигурацией орбиты и высотой. Эти испытания проводились в рамках программы Китая по изучению Луны и отработывали технологии для планируемого в 2017 г. запуска лунного модуля «Чанъэ-5» [15].

Для готовящейся марсианской экспедиции Jet Propulsion Laboratory разрабатывается беспилотник «Mars Helicopter», который представляет собой вертолет квадратной формы небольших размеров. Он должен будет не только передавать данные на Землю, но и разрабатывать безопасные маршруты по марсианской поверхности для марсоходов. Питание «Mars Helicopter» будет осуществляться с помощью солнечной энергии. Если разработка будет успешной, то для экспедиции будут произведены десятки таких дронов, которые смогут собирать информацию, геологические и метеорологические данные в разных районах Марса [16].

СТРАТОСФЕРНЫЕ БПЛА

В разных странах разрабатываются проекты *стратосферных БПЛА*. Одним из первых аппаратов подобного вида был Global Observer производства американской компании AeroVironment, разработка которого была начата в 2007 г. в рамках программы NASA Joint Capability Technology Demonstration. На разработку аппарата было выделено 140 млн долл. [17]. Этот аппарат имеет возможность вести разведку с высоты до 20 км, находясь в воздухе 5–7 дней без посадки и дозаправки. Создание этого БПЛА позволило американским военным использовать его в качестве защищенной стратосферной платформы для разведки и коммуникации, заменяя тем самым космические спутники связи. В 2010 г. начались работы над проектом стратосферного БПЛА компании Boeing Vulture (Solar Eagle), который должен быть способен находиться в полете 5 лет. Под этот проект компания получила 89 млн долл.

В настоящее время разработка стратосферных БПЛА перешла на новую стадию, когда появилась возможность использовать эти аппараты в качестве геостационарных спутников, но гораздо более дешевых и легко заменяемых. Их экономическая эффективность в сочетании с использованием новых технологий длительного нахождения на одном месте (от нескольких недель до нескольких лет) определяет их коммерческую ценность, особенно в тех регионах, которые не разработали альтернативной наземной инфраструктуры для сотовой связи, таких как Африка, Китай и Индия.

Стратосферные БПЛА способны выполнять ряд задач, ставящихся перед космическими искусственными спутниками, но при этом они обладают способностью садиться на поверхность для технического обслуживания и пополнения запасов энергии, что делает их применение экономически выгодным. Они могут проводить тепловую и аэросъемку, осуществлять контроль за экологической ситуацией, поддерживать работы аварийных и спасательных служб, создавать временные коммуникационные и навигационные системы.

В рамках программы High Altitude Pseudo-Satellite (HAPS) был создан беспилотник Zephyr, который в сентябре 2014 г. поднялся на рекордную высоту, превышающую 18 км, и находился в воздухе почти сутки. Вес аппарата составляет всего 34 кг при размахе крыльев в 18 м. Аналогичная разработка была осуществлена компанией Titan Aerospace, создавшей атмосферные БПЛА Solara 50 и Solara 60, работающие на солнечных батареях. Возможности, открывающиеся в связи с использованием таких БПЛА, привлекли компанию Google, и в апреле 2014 г. она приобрела Titan Aerospace. Ранее планы на ее приобретение имела компания Facebook, но в результате ею была куплена британская компания Ascenta, участвовавшая в разработке упоминавшегося ранее БПЛА Zephyr [18].

Покупка Google и Facebook компаний, производящих стратосферные БПЛА, имеет одинаковую цель – обеспечить покрытие сетью Интернет труднодоступных регионов Земли, а также районов, пострадавших от различных природных катаклизмов. Стратосферные БПЛА, находясь на высоте около 20 км, в будущем смогут обеспечивать подключение к Интернету со скоростью до 1 Гбит/с местности в радиусе 1,6 км, при этом не требуя ремонта в течение 5 лет [19]. Кроме того, беспилотники Solara будут вести фотосъемку для карт Google, контролировать состояние атмосферы и т.д.

Полеты в стратосфере могут осуществлять и два БПЛА разработки компании ARCA: AirStrato Explorer и AirStrato Pioneer (табл. 2). Эти модели похожи на военные беспилотники. Первый аппарат больше по размерам и весу и способен подняться на высоту до 18 км. Управление аппаратами осуществляется через спутник или GPS. В 2015 г. ожидалось начало серийного производства этих БПЛА, а стоимость их оценивается в 140 тыс. и 80 тыс. долл. соответственно [4].

Таблица 2. Технические характеристики стратосферных БПЛА

Модель	Helios	Global Observer	Zephyr 6	Zephyr 7	Zephyr S	Zephyr T	AirStrato Explorer	AirStrato Pioneer	Hawk30	Solara 50	Solara 60
Компания	NASA	AeroVironment	Airbus				ARCA		HAPS Mobile	Titan Aerospace	
Год первого полета	2001	2007	2008	2010	2017	2018	2014	2014	2019	2013	2013
Размах крыла, м	75	53	н.д.	22,5	28	33	16	12	78	50	60
Максимальная взлетная масса, кг	н.д.	1805	н.д.	53	75	165	230	220	н.д.	160	н.д.
Масса полезной нагрузки, кг	н.д.	180	н.д.	2,5	5	20	45	45	н.д.	32	100
Высота полета, км	29,5	20	19	21,6	23,2	20	18,3	8	20	н.д.	н.д.
Продолжительность полета, дней	1	7	3,4	14	26	45	0,83	0,5	н.д.	н.д.	н.д.
Масса пустого аппарата, кг	н.д.	159	н.д.	34	65	140	185	175	н.д.	н.д.	н.д.
Потребляемая энергия, кВт	н.д.	2,8	н.д.	0,9	0,9	н.д.	1,2	1,2	н.д.	7	н.д.
Крейсерская скорость, км/ч	н.д.	42,5	н.д.	56	56	н.д.	152	100	110	105	104

Источник: [4, 17–19].

Компания Homeland Security Market Research еще в 2008 г. высоко оценивала потенциал рынка стратосферных БПЛА для обеспечения мобильной связью труднодоступных регионов Земли. А аналитический отчет компании Market Info Group, оценивая рынок стратосферных БПЛА примерно в 100 млн долл. в 2012 г., прогнозировал его рост по пессимистическому сценарию до 37,8 млрд долл., а по самому оптимистическому – до 720 млрд долл. [20]. Однако в 2018 г. более 58,9% рынка стратосферных БПЛА и полезных грузов для них приходилось на военный сегмент, а его рыночная стоимость составила 276,2 млн долл. [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, с одной стороны, космические и стратосферные БПЛА открывают новые возможности для человечества как в области исследования других планет, так и для улучшения жизни на Земле, а с другой – использование их в военных целях, размещение на них вооружения может привести к непредсказуемым последствиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Quadrennial Defense Review 2014 – U.S. Department of Defence, 2014. URL: https://dod.defense.gov/Portals/1/features/defenseReviews/QDR/2014_Quadrennial_Defense_Review.pdf (дата обращения: 29.12.2021).
2. Unknown Budget, Unknown Purpose: U.S. Air Force Plans to Launch X-37B Orbital Test Vehicle. 04.04.2010. URL: <http://www.cryptogon.com/?p=14626> (дата обращения: 16.08.22).
3. В «Алмаз-Аннее» рассказали о космическом корабле США, способном нести ядерное оружие. URL: <https://ria.ru/20210522/x-37-1733467460.html> (дата обращения: 08.01.2022).
4. Пентагон предоставил Boeing право построить и испытать беспилотный многоразовый космолан. URL: https://vpk.name/news/182498_pentagon_predostavil_boeing_pravo_postroit_i_ispytat_bespilotnyj_mnogorazovyj_kosmoplan.html (дата обращения: 08.01.2022).
5. Планы НАСА: Надувные модули космических станций, орбитальная заправочная станция и космические беспилотники // Портал DailyTechInfo. 25.02.2010. URL: <http://www.dailytechinfo.org/space/1066-planu-nasa-naduvnye-moduli-kosmicheskix-stancij.html> (дата обращения: 08.01.2022).
6. Collins G., Erickson A. Shenlong ‘Divine Dragon’ Takes Flight: Is China developing its first spaceplane? // China SignPost, 4 May 2012. URL: <http://www.chinasignpost.com/2012/05/04/shenlong-divine-dragon-takes-flight-is-china-developing-its-first-spaceplane/> (дата обращения: 08.01.2022).
7. Итальянская программа USV (Unmanned Space Vehicle). 04.03.2010. URL: <http://novosti-kosmonavtiki.ru/forum/forum13/topic10617/> (дата обращения: 08.01.2022).
8. ЕКА: полет беспилотника IXV прошел успешно // РИАНовости. 11.02.2015. URL: <http://ria.ru/space/20150211/1047164544.html> (дата обращения: 08.01.2022).
9. Первый европейский многоразовый беспилотник запущен в космос. URL: <https://www.infox.ru/news/245/143184-pervyj-evropejskij-mnogorazovyj-bespilotnik-zapusen-v-kosmos> (дата обращения: 08.01.2022).
10. X-37 Demonstrator to Test Future Launch Technologies in Orbit and Reentry Environments / NASA Fact-sheet number: FS-2003-05-65-MSFC. URL: <http://www.nasa.gov/centers/marshall/news/background/facts/x37facts2.html> (дата обращения: 08.01.2022).
11. DARPA Experimental Spaceplane 1 (XS-1). URL: <https://www.space.com/29287-xs1-experimental-spaceplane.html> (дата обращения: 17.05.2022).
12. Skylon. Aerospace Technology. URL: <https://www.aerospace-technology.com/projects/skylon-vehicle/> (дата обращения: 08.01.2022).
13. SCRAMSPACE Fact Sheet / Center for Hypersonics, University of Queensland, Australia. URL: <http://hypersonics.mechmining.uq.edu.au/scramspace-fact-sheet> (дата обращения: 08.01.2022).
14. AVIATR – Unmanned Aircraft Mission for Titan // UAS Vision. 09.01.2012. URL: <http://www.uasvision.com/2012/01/09/aviatr-unmanned-aircraft-mission-for-titan/> (дата обращения: 09.01.2022).
15. Китайский космический беспилотник завершил тесты на окололунной орбите. 09.02.2015. URL: <http://ekd.me/2015/02/moon-mission-complete/> (дата обращения: 09.01.2022).
16. Для исследования Марса готовят новые беспилотники // GlobalScience.ru. 02.02.2015. URL: <http://globalscience.ru/article/read/25891/> (дата обращения: 09.01.2022).
17. Aerovironment’s Global Observer: Flying High, Again // Defense Industry Daily. 06.04.2011. URL: <http://www.defenseindustrydaily.com/aerovironments-global-observer-flying-high-again-03902/#Contracts&KeyEvents> (дата обращения: 09.01.2022).
18. Titan Aerospace продан Гуглу // Rusbase. 15.04.2014. URL: <http://rusbase.vc/news/titan-aerospace-prodalsya-guglu/> (дата обращения: 09.01.2022).

19. Google купила производителя дронов на солнечной энергии Titan Aerospace // ИТС.ua. 15.04.2014. URL: <http://itc.ua/news/google-kupila-proizvoditelya-dronov-na-solnechnoy-energii-titan-aerospace/> (дата обращения: 09.01.2022).
20. Stratospheric UAV Payloads – Technology and Market Forecast – 2012-2021 / Market Info Group LLC, 2011.
21. Stratospheric UAV Payload Technology Market Share, Size, Global Development, Growth Status, Sales Revenue, Emerging Technologies, Key Players Analysis, Opportunity Assessment and Industry Expansion Strategies 2024. URL: <https://www.marketwatch.com/press-release/stratospheric-uav-payload-technology-market-share-size-global-development-growth-status-sales-revenue-emerging-technologies-key-players-analysis-opportunity-assessment-and-industry-expansion-strategies-2024-2021-10-18> (дата обращения: 09.01.2022).

ГЛАВА 11.

БПЛА ВЕРТОЛЕТНОГО ТИПА

ВВЕДЕНИЕ

БПЛА с вращающимся крылом имеют очень широкий диапазон применений благодаря их вертикальному взлету и посадке (VTOL), зависанию и низкой скорости. Они чаще, чем самолеты с фиксированным крылом, используются для исследований в области авиационной робототехники университетами и научно-исследовательскими институтами, применяются для инспекции объектов, которые требуют маневрирования вокруг ограниченных пространств и способности поддерживать визуальное изображение на одной цели в течение длительного времени.

К БПЛА с вращающимся крылом относится широкий диапазон установок, в который входят БПЛА с одним ротором (вертолетного типа), с двумя, тремя роторами, с 4 роторами (квадрокоптеры) и мультикоптеры (6 роторов – гексакоптеры, 8 роторов – октокоптеры и т.д.). И в этом случае каждая установка имеет свои уникальные характерные преимущества и недостатки.

Обычно выделяют 5 основных категорий БПЛА с вращающимся крылом [1].

1. «Tilt Blade Tip-Path-Plane» – это самый распространенный аппарат, вертолетного типа, с основным ротором, который используется как для подъема, так и для перемещения.

2. «Tilt-Body» – в этом случае используются разные роторы, а тело аппарата или его часть, на которой установлены роторы, наклонены.

3. «Tilt-Rotor» – один или несколько роторов полностью наклонены.

4. Различные гибридные аппараты, в которых роторы сочетаются с крыльями, пропеллерами или другим вспомогательным двигателем.

5. Особые случаи, когда сам ротор становится неподвижным крылом (например, останавливается на высоких скоростях – стоп-ротор или лопасти втягиваются в круглое крыло в случае переменного диаметра ротора).

Таблица 1

Структура разрабатываемых моделей БПЛА по типу крыла

Тип крыла	2006	2010	2013	2015	2016	2018	2021
Машущее крыло	0,8	0,9	1,0	0,7	0,7	0,7	0,9
Фиксированное крыло	71,6	70,1	67,8	66,6	60,4	51,8	46,1
Аэростаты	1,5	3,3	2,7	2,3	2,0	0,7	0,6
Парапланы	1,5	1,6	0,9	0,8	0,7	0,3	0,4
Вращающееся крыло	18,4	18,5	23,2	25,3	31,6	39,5	42,5
Закрытый винт	2,7	3,8	3,4	3,3	3,0	2,4	1,6
Наклонное тело	0,5	0,4	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
Наклонный винт	1,2	1,0	0,8	0,7	0,6	0,3	0,5
Наклонное крыло	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,5
Всего	100	100	100	100	100	100	100

Источник: [2].

В структуре разрабатываемых моделей в мире происходит рост доли БПЛА с вращающимся крылом (RW, табл. 1), в основном, за счет сокращения доли аппаратов с

фиксированным крылом. Если в 2006 г. было всего 18,4% моделей типа RW, то к 2021 г. их доля составляла 42,5%. За тот же период доля моделей с фиксированным крылом снизилась с 71,6 до 46,1%. Объектом исследования в данной статье являются БПЛА вертолетного типа, т.е. аппараты, имеющие один винт.

БПЛА вертолетного типа по своим параметрам могут относиться к различным категориям в зависимости от их массы, дальности, высоты и продолжительности полета. Они могут использоваться как для военных, так и для гражданских целей. Для анализа технико-экономических показателей этого типа БПЛА были выделены модели, имеющие одинаковый состав и технологии производства и предназначенные для выполнения одинаковых задач [3]. В данной работе будут рассмотрены модели среднего и малого радиуса действия. Глава подготовлена на основе статьи автор*.

БПЛА ВЕРТОЛЕТНОГО ТИПА СРЕДНЕГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ

Аппараты среднего радиуса действия (Medium Range, MR), согласно классификации The Remotely Piloted Systems (RPS) [4], имеют дальность полета свыше 70 км, продолжительность – более 5 часов, высоту – около 5 км и массу свыше 1200 кг. К этой категории относятся Firescout (компании Northrop Grumman, США), Camcopter (Schiebel, Австрия), Sea Eagle (Textron-Bell, США), Seagull (Beijing, Китай) и др.

БПЛА «Fire Scout» – это совместная разработка компаний Northrop Grumman, Lockheed Martin и Швейцарской авиастроительной корпорации для военно-морского флота США. Аппарат создавался на базе пилотируемого вертолета Schweizer 333SP в качестве недорогого воздушного транспорта, способного вести разведку, наблюдение и наведение на цель. В феврале 2000 г. Министерство обороны США заключило контракт с компанией Northrop Grumman в размере 93,7 млрд долл. для разработки БПЛА. Первая модель, RQ-8A «Fire Scout», совершила первый полет в 2002 г. [5].

По мере развития RQ-8A был внесен ряд конструктивных изменений в устройство аппарата и его системы. Это изменение было обусловлено низкой производительностью RQ-8A при первоначальном тестировании, в результате чего он был выведен из программы ВМФ США. Аппарат был переименован в модель MQ-8B и совершил первый полет в 2006 г. В августе 2006 г. был заключен новый контракт между Northrop Grumman и ВМФ США в размере 135,8 млн долл.

В 2013 г. был продемонстрирован БПЛА следующего поколения – MQ-8C «Fire Scout». MQ-8C – это беспилотная адаптация коммерческого вертолета Bell 407, построенного Northrop Grumman и Bell Helicopter. Самолет использует по большей части ту же архитектуру, что и MQ-8B Fire Scout, но имеет большую продолжительность полета (12 часов) и грузоподъемность (см. табл. 2). Размер контракта составил 262 млн долл.

В табл. 2 представлены технико-экономические показатели 11 БПЛА вертолетного типа среднего радиуса действия, среди которых 3 – модификации FireScout. Среди рассматриваемых моделей 2 БПЛА являются российскими разработками, хотя «Горизонт» создан

* Дубинина М.Г., Макарова Ю.А. Анализ технико-экономических показателей беспилотных транспортных средств // Научно-практический журнал «Концепции». 2018. № 1 (37). С. 28–44.

совместно с австрийскими партнерами по аналогу с Camcopter S-100. DPV-500 является разработкой компании «Радар ммс» из Санкт-Петербурга.

Таблица 2

Техническо-экономические характеристики БПЛА среднего радиуса действия (по)

Наименование модели	RQ-8A Fire Scout	DP-4	Camcopter S-100	Skeldar V-200	Orka	MQ-8B Fire Scout	IFF-4.5	Горизонт ЭЙР S-100	MQ-8C FireScout	Skeldar V-600	DPV-500
Страна	США	США	Австрия	Швеция	Франция	США	Германия	Россия	США	Швеция	Россия
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Год первого полета	2000	2002	2005	2006	2006	2006	2009	2011	2013	2014	2015
Диаметр ротора, м	8,38	2,82	3,4	4,7	7,2	н.д.	н.д.	3,4	9,76	7	6,2
Длина, м	6,98	3	3,1	4	6,22	6,95	н.д.	3,4	12,58	н.д.	6,1
Высота, км	6,1	4,1	5,5	2,4	5,1	6,1	н.д.	н.д.	4,9	н.д.	4
Дальность, км	177	50	200	150	185	280	н.д.	180	2270	н.д.	500
Мощность, Квт	310	н.д.	36,8	41	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	515	н.д.	н.д.
Максимальная скорость, км/ч)	230	160	220	130	205	230	300	220	250	н.д.	180
Максимальная взлетная масса, кг	1200	64	200	235	680	н.д.	220	н.д.	2720	600	500
Продолжительность полета, часов	5	1,5	6	5	8	8	10	6	12	8	8
Максимальная нагрузка, кг	н.д.	29	50	40	150	272	н.д.	35	н.д.	100	180
Цена, млн долл.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	16	н.д.	н.д.	20	н.д.	н.д.

Источник: авторская разработка по данным [6–8].

Для аппаратов этого класса наблюдается экспоненциальная зависимость между максимальной взлетной массой и диаметром ротора (рис. 1).

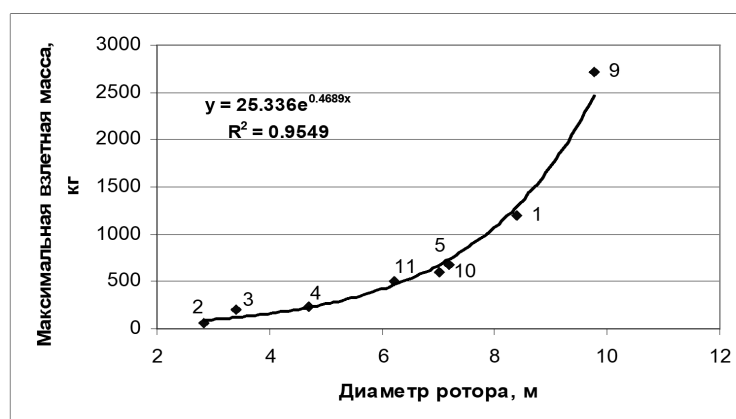


Рис. 1. Зависимость максимальной взлетной массы от диаметра ротора БПЛА вертолетного типа среднего радиуса действия

Источник: авторская разработка по данным [6–8].

Для БПЛА вертолетного типа среднего радиуса действия была получена зависимость его максимальной полезной нагрузки (y) от диаметра ротора (x) и времени первого полета (T) в виде:

$$\ln(y) = 1,99 \ln(x) - 0,29 \ln(T - 1999) + 1,79, \quad R^2 = 0,85,$$

(4,93) (-1,56) (2,31)

Таким образом, масса полезной нагрузки этого типа БПЛА растет с увеличением диаметра ротора и снижается со временем. Рост продолжительности полета сопровождается увеличением отношения массы полезной нагрузки к диаметру ротора БПЛА (рис. 2).



Рис. 2. Зависимость между продолжительностью полета и отношением массы полезной нагрузки к диаметру ротора для БПЛА вертолетного типа среднего радиуса действия

Источник: авторская разработка по данным [6–8].

Кроме того, происходит снижение энергопотребления БПЛА в расчете на 1 кг максимальной взлетной массы и увеличение продолжительности полета с течением времени (рис. 3).

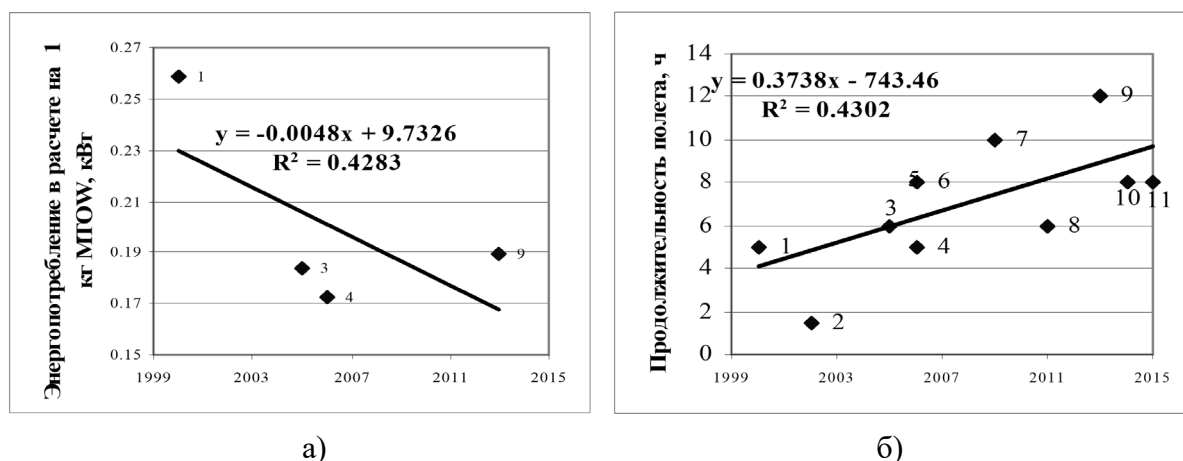


Рис. 3. Изменение показателей энергопотребления в расчете на 1 кг МТОВ (а) и продолжительности полета (б) БПЛА вертолетного типа среднего радиуса действия

Источник: авторская разработка по данным [6–8].

БПЛА вертолетного типа среднего радиуса действия пользуются большим спросом на международном рынке. Стоимость одного MQ-8 Fire Scout выросла с 16 млн долл. (серия

В) до 20 млн долл. (серия С). Австрийский Camcopter S-100, по данным SIPRI, в количестве более 90 ед. был продан в 7 стран мира, еще несколько стран (в том числе Россия) выпускают его по лицензии. На 2015 г. стоимость аппарата оценивалась в 60 млн руб. (свыше 1 млн долл. [9]).

БПЛА ВЕРТОЛЕТНОГО ТИПА МАЛОГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ (SHORT RANGE, SR)

К БПЛА вертолетного типа малого радиуса действия (Short range, SR) относятся аппараты с продолжительностью полета до 6 часов, максимальной взлетной массой (MTOW) до 200 кг, высотой полета – около 3 км. Эту категорию среди БПЛА представляют несколько европейских разработок: французские БПЛА Scorpio 6 и 30, HE300, шведские Skeldar V-125, 150 и 250, Apid 55 и 60, немецкие Shark и Marvin L40. К этому же классу относится американский DP-5X Wasp. В основном эти аппараты предназначены как для военных (воздушное наблюдение, целеуказание, оценка нанесенных противнику повреждений), так и для гражданских целей (для помощи полиции и службам безопасности, мониторинга промышленных объектов, нефте- и газопроводов и др.).

Основные технические характеристики этих аппаратов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Технические характеристики БПЛА вертолетного типа малого радиуса действия

№	Наименование	Год первого полета	Диаметр ротора, м	Длина, м	Высота полета, км	Дальность (км)	Максимальная скорость (км/ч)	MTOW, кг	Продолжительность полета (часов)	Максимальная нагрузка, кг
1	Marvin L40	2002	2,5	2	н.д.	100	н.д.	40	2	20
2	Scorpio 30	2003	2,2	2	2,1	10	70	35	2	15
3	Scorpio 6	2003	1,8	1,8	2	10	30	13	1	6
4	Apid 55	2005	3,2	3,3	3	50	99	150	6	н.д.
5	DP-5X Wasp	2006	4,2	3,4	3,1	75	219	200	5,2	75
6	Shark	2007	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	160	190	4	60
7	Skeldar V-150	2008	3,3	4	3,5	100	100	150	4	30
8	Skeldar-M (V-250)	2008	н.д.	н.д.	н.д.	180	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
9	HE300	2010	3	3,74	н.д.	н.д.	90	49,5	4	20
10	Skeldar V-125	2011	3,5	н.д.	2,5	40	120	125	3,5	15
11	Apid 60	2011	4	3,3	3,1	100	120	160	6	55

Источник: авторская разработка по данным [6, 7, 10].

Для БПЛА малого радиуса действия наблюдается экспоненциальная зависимость массы полезной нагрузки от диаметра ротора (рис. 4).

Для этого класса получена также зависимость логарифма максимальной взлетной массы (y_1) от логарифмов диаметра ротора (x_1) и даты первого полета БПЛА (t) (в скобках указаны t -статистики):

$$\ln(y_1) = 3,9 \ln(x_1) - 0,37 \ln(t - 2001) + 0,71, \quad R^2 = 0,93,$$

(5,9)
(-1,3)
(1,5)

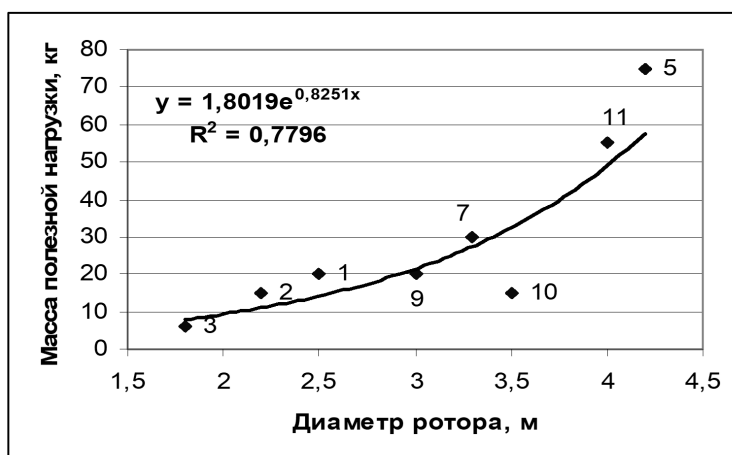


Рис. 4. Зависимость массы полезной нагрузки от диаметра ротора БПЛА вертолетного типа малого радиуса действия

Источник: авторская разработка по данным [6, 7, 10].

Для аппаратов, первый полет которых состоялся до 2004 г. (1 поколение) и после (2 поколение), получены похожие тенденции снижения отношения массы полезной нагрузки к диаметру винта БПЛА, но у 2-го поколения этот показатель выше (рис. 5).

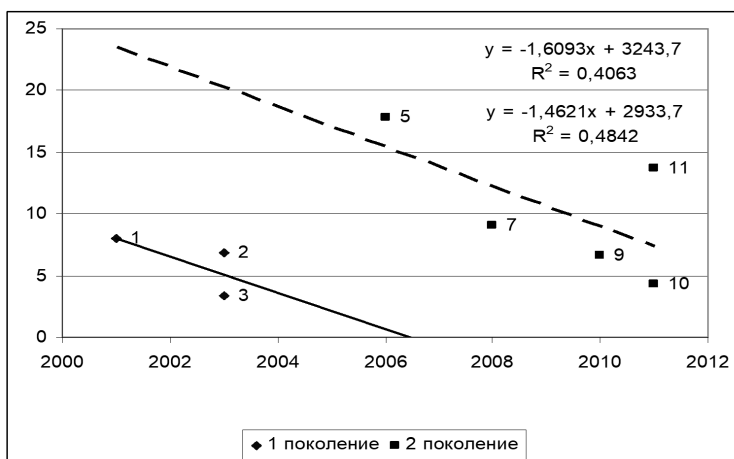


Рис. 5. Изменение отношения массы полезной нагрузки к диаметру ротора БПЛА, кг/м, 2001–2011 гг.

Источник: авторская разработка по данным [6, 7, 10].

Также была оценена модель зависимости продолжительности полета (y_2) и его дальности (y_3) от грузоподъемности (x_2) и года первого полета:

$$\ln(y_2) = 0,41 \ln(x_2) - 0,45 \ln(t - 2001) - 0,9, \quad R^2 = 0,96,$$

(5,8) (4,9) (-4,3)

$$\ln(y_3) = 0,58 \ln(x_2) - 0,84 \ln(t - 2001) - 0,47, \quad R^2 = 0,91.$$

(2,4) (2,7) (0,7)

Анализ показателей БПЛА вертолетного типа малого радиуса действия по поколениям свидетельствует об увеличении продолжительности полета аппаратов 2-го поколения, при этом коэффициент зависимости между продолжительностью полета и отношением массы полезной нагрузки к диаметру ротора изменился незначительно (рис. 6).

Таким образом, получено, что развитие БПЛА вертолетного типа малого радиуса действия направлено в сторону увеличения продолжительности и дальности полета, уменьшения максимальной взлетной массы. При этом продолжительность полета и его дальность положительно связаны с грузоподъемностью. Максимальная взлетная масса растет с увеличением диаметра ротора.



Рис. 6. Зависимость между продолжительностью полета БПЛА вертолетного типа малого радиуса действия и отношением массы полезной нагрузки к диаметру ротора по поколениям

Источник: авторская разработка по данным [6, 7, 10].

БПЛА ВЕРТОЛЕТНОГО ТИПА ДЛЯ КОММЕРЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

В структуре коммерческого применения БПЛА преобладают БПЛА роторного типа с одним или несколькими винтами. Они пользуются большим спросом в таких областях, как наблюдение, фотосъемка, картографирование и мониторинг [11]. Кроме того, их используют для доставки грузов за счет их большей грузоподъемности. По данным Research and Markets [12], ожидалось, что к 2020 г. рынок БПЛА роторного типа вырастет до 4,93 млрд долл. (среднегодовой рост за 2015–2020 гг. составит 31.4%).

Наиболее широко БПЛА вертолетного типа используются в сельском хозяйстве. Первый беспилотник для сельского хозяйства был создан в Японии в 1987 г. компанией Yamaha Motors. Аппарат R-50 в последствии послужил прототипом одного из самых популярных БПЛА для сельского хозяйства – R-MAX. В настоящее время в Японии используется для мониторинга, посева и опрыскивания сельскохозяйственных культур около 2400 беспилотников вертолетного типа, которые обрабатывают около 1000 га земель. Компания планирует увеличить свои ежегодные отгрузки беспилотных вертолетов с 320 ед. в 2015 г. до 500 ед. к 2020 г. [13]. При этом средняя цена аппаратов R-MAX оценивается в 80–120 тыс. долл. [14], Fazer RG2 – новой разработки компании этого же типа – около 130 тыс. долл.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие БПЛА вертолетного типа направлено на увеличение времени и продолжительности полета, снижение энергопотребления в расчете на 1 км дальности полета. При этом растет отношение массы полезной нагрузки к диаметру ротора. Коэффициент

эластичности массы полезной нагрузки на 1 м диаметра для БПЛА малого радиуса действия почти в 2 раза больше, чем для БПЛА среднего радиуса действия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Basset P.-M., Tremolet A., Lefebvre T. Rotary Wing UAV pre-sizing: Past and Present Methodological Approaches at Onera // Aerospace Lab, Issue 8 – December 2014, p. 1-12.
2. RPAS. The Global Perspective. Yearbook 2014-2021. – Blyenburgh & Co. URL: <https://rps-info.com/publications/> (дата обращения: 17.05.2022).
3. Дубинина М.Г. Техничко-экономический анализ военных БПЛА Израиля // Научно-практический журнал «Концепции». 2017. № 1 (36). С. 20–28.
4. The Remotely Piloted Systems. URL: <https://rps-info.com/> (дата обращения: 24.12.2021).
5. MQ-8B Fire Scout Program Support Analysis for Commander Helicopter Maritime Strike Wing Atlantic Fleet. – 10 March 2009.
6. Avia Pro. URL: <http://avia.pro/blog/prochie> (дата обращения: 24.12.2021).
7. Уголок неба. БПЛА. URL: <http://www.airwar.ru/bpla.html> (дата обращения: 24.12.2021).
8. Northrop Grumman. Autonomous Systems. URL: http://www.northropgrumman.com/Capabilities/FireScout/Documents/pageDocuments/MQ-8C_Fire_Scout_Data_Sheet.pdf (дата обращения: 24.12.2021).
9. Camcopter_S-100. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Camcopter_S-100 (дата обращения: 24.12.2021).
10. Unmanned, versatile and mission ready – Saab Aeronautics UAV briefing. URL: <https://saabgroup.com/> (дата обращения: 26.05.2022).
11. Дубинина М.Г. Анализ технико-экономических показателей БПЛА гражданского назначения в странах ЕС // Анализ и моделирование экономических и социальных процессов / Математика. Компьютер. Образование: Сб. научн. трудов (выпуск 23). № 2. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2016.
12. Global UAV Drones (Fixed Wing, Rotary Blade, Nano, Hybrid) Market 2015 – Analysis & Forecast to 2020 URL: <https://globenewswire.com/news-release/2016/02/24/813656/0/en/Global-UAV-Drones-Fixed-Wing-Rotary-Blade-Nano-Hybrid-Market-2015-Analysis-Forecast-to-2020.html> (дата обращения: 24.12.2021).
13. Financial Times. Yamaha aims to unlock US and EU markets with agricultural drone. URL: <https://www.ft.com/content/626684e2-2181-11e5-aa5a-398b2169cf79> (дата обращения: 24.12.2021).
14. Top agriculture spraying drones: DJI Agras MG-1 vs Yamaha RMAX. URL: <http://droneson-video.com/agriculture-drones-dji-agras-mg-1-vs-yamaha-rmax/> (дата обращения: 24.12.2021).

ГЛАВА 12. АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗВИТИЯ ГИБРИДНЫХ БПЛА

ВВЕДЕНИЕ

Общее количество проданных за год профессиональных сервисных роботов выросло за период 2010–2018 гг. почти в 20 раз (с 13,741 тыс. ед. в 2010 г. до 271 тыс. ед. в 2018 г.), в стоимостном выражении рост был менее значительным (с 3,3 млрд долл. в 2010 г. до 9,2 млрд долл. в 2018 г.) [1]. Среди профессиональных сервисных роботов особое место занимали военные роботы, большую долю которых представляли беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Однако в последнее время доля военных роботов в ежегодных продажах сервисных роботов сократилась с 30,7% в 2012 г. до 11% в 2017 г. (одновременно доля БПЛА в общих продажах профессиональных сервисных роботов сократилась с 27% в 2012 г. до 9,4% в 2017 г.), а в стоимостном выражении – с 24,3% в 2013 г. до 14,4% в 2017 г. Вместе с тем, по данным на 2018 г., наиболее продаваемыми профессиональными сервисными роботами были логистические системы (около 63% общего количества проданных роботов), которые включают в себя также беспилотные и воздушные средства доставки вне помещений, т.е. БПЛА для гражданских и коммерческих целей.

Одним из наиболее часто используемых и популярных видов сервисных роботов являются беспилотные летательные аппараты. По типу крыла они делятся на два основных класса: БПЛА с фиксированным и с вращающимся крылом. Каждый класс имеет свои преимущества. Однако довольно часто требуются аппараты, способные выполнять широкий спектр различных дополнительных операций в рамках одной миссии. Эти операции включают взлет и посадку с ограниченного пространства с пересечением района операции с высокой скоростью, кроме того, может потребоваться полет на низких скоростях или зависание для стационарных измерений и мониторинга. Все эти взаимодополняющие, но разные эксплуатационные возможности указывают на концепцию гибридного беспилотного транспортного средства. Рассмотрим гибридные аппараты на основе конструкции с фиксированным крылом. Глава подготовлена на основе статьи*.

В общем случае гибридные БПЛА делятся на два основных типа: конвертопланы (convertiplane) и аппараты с вертикальным положением фюзеляжа (tail-sitter) [2]. Конвертопланы – это летательные аппараты с изменяющимся положением крыла, ротора, двигателя для изменения вертикального вектора тяги в момент взлета или посадки на горизонтальное во время полета [3]. Беспилотные летательные аппараты типа tail-sitter взлетают и приземляются вертикально на хвост. Конструкция таких БПЛА не содержит поворотных элементов.

Оба типа, в свою очередь, подразделяются на несколько подтипов, в зависимости от конкретных механизмов перехода и конфигурации планера. Среди конвертопланов выделяют аппараты с поворотными винтами (Tilt-rotor, TR), с поворотным крылом (Tilt-wing, TW), с наклонным корпусом (Tilt-body, TB) и со свободным крылом (Free-wing, FrW) [4, 5].

* Комкина Т.А., Никонова М.А., Дубинина М.Г. Техничко-экономический анализ отдельных видов сервисных роботов // Экономический анализ: теория и практика. 2020. Т. 19. Вып. 10. Октябрь. С. 1965–1986. DOI: <https://doi.org/10.24891/ea.19.10.1965>

Среди гибридных конструкций выделяются БПЛА с наклонным ротором благодаря своей стабильности, энергоэффективности и управляемости [6].

Гибридные беспилотники, которые могут переходить от вертикального взлета и посадки (Vertical Take-Off and Landing, VTOL) к полету с фиксированным крылом, становятся все более популярными. Аппараты нового поколения более маневренны, чем самолеты с фиксированным крылом, требуют меньше места для запуска и приземления, однако эти преимущества компенсируются такими недостатками, как низкие эффективность и выносливость, ограничения полезной нагрузки. Системы VTOL используют роторы для создания подъемной силы и тяги, что требует большей мощности по сравнению с самолетами с неподвижным крылом, которым требуется только силовая установка, поскольку подъемная сила создается крыльями [7].

Количество разрабатываемых моделей гибридных БПЛА выросло почти в 3 раза за период 2015–2018 гг. (с 14 моделей в 2015 г. до 38 в 2018 г. [8]). Несколько проектов были успешно коммерциализированы (например, FireFLY6 компании BirdsEyeView [9], X PlusOne). В настоящее время на рынке доступно все большее количество гибридных систем вертикального взлета и посадки, каждая из которых имеет свои сильные и слабые стороны, а также широкий диапазон цен. Среди них преобладают модели гибридных мини-БПЛА, которые стали довольно популярными в мире за счет постоянного снижения затрат на производство миниатюрных аппаратов, моторов и их элементов.

Разработка гибридных БПЛА ведется и в России. Так, компания ZALA AERO, входящая в концерн «Калашников», в 2020 г. представила конвертоплан ZALA 421-16EV HD с вертикальным взлетом и посадкой в полностью автономном режиме. В зависимости от целевой полезной нагрузки (видеокамера, фотоаппарат, тепловизор, газоанализатор, дозиметр) он может найти широкое применение для аэрофотосъемки, мониторинга, в топливно-энергетическом комплексе [10].

На данный момент гибридные БПЛА находятся все еще на начальной стадии разработок, поэтому пока нельзя выделить существенные различия моделей по поколениям. У этих аппаратов есть много направлений для дальнейшего развития, такие как управление, переход из стадии вертикального взлета на горизонтальный полет, навигация и надежность. Тем не менее, учитывая их быстро растущую популярность, считается, что гибридные беспилотники будут быстро развиваться и могут сформировать основную долю рынка БПЛА.

Поскольку гибридный беспилотный летательный аппарат может работать в местах, где нет взлетно-посадочной полосы, его можно применять в широком спектре областей, таких как борьба со стихийными бедствиями, военные операции, наблюдение за автотранспортными средствами, дистанционная диагностика энергетических объектов и крупных сооружений [11]. Мировой рынок гибридных БПЛА в 2019 г. оценивался в 498 млн долл. и планировалось его многократное увеличение к 2030 г. (до 3583 млн долл.) [12].

Первые гибридные БПЛА имели военное назначение, однако многие теперь используются и для гражданских целей. Например, FE-Panther обнаруживает лесные пожары и незаконный лов рыбы, может контролировать дорожное движение, передавая информацию в режиме реального времени [13].

Аппарат WingtraOne используется Норвежской дорожной администрацией при контроле национальной и региональной дорожной сети. Проведенные

специалистами расчеты показали, что использование гибридного аппарата оказалось наиболее эффективным решением для построения карты местности и ее мониторинга. Согласно расчетам, стоимость одного обследования строительства дороги длиной 5 км аппаратом WingtraOne оценивается в 270 долл., мультиротором – в 970 долл., наземным лазерным сканером – в 5,2 тыс. долл., вертолетом – более чем в 11 тыс. долл. [14]. Есть примеры применения гибридных БПЛА и в России. Так, компания «РН-Пурнефтегаз» внедрила беспилотный комплекс гибридного типа для выполнения аэромониторинга трубопроводов на собственных месторождениях [15].

СРАВНЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИБРИДНЫХ БПЛА И БПЛА С ФИКСИРОВАННЫМ КРЫЛОМ

В нашем исследовании рассматривались гибридные БПЛА типа конвертопланов с фиксированным крылом, но осуществляющие вертикальный взлет и посадку (VTOL). При этом отбирались аппараты с размахом крыла не более 4 м и максимальной взлетной массой до 50 кг (всего 20 моделей производства компаний Mugin, Sometown, WelkinUAV (все – Китай), Vertical Technologies (Нидерланды), FoxTech (Германия) и др., первый полет которых осуществлялся в период 2014–2019 гг., табл. 1).

Таблица 1

Технико-экономические показатели моделей гибридных БПЛА

Модель	Страна	Год	Размах крыла, м	Масса пустого аппарата, кг	Скорость полета, км/ч	Взлетная масса, кг	Время полета, ч	Цена, тыс. долл.
X PlusOne	США	2014	0,8	1,3	100,0	1,3	0,3	1,5
EWG-E2V VTOL								
Fixed-wing	Китай	2015	2,9	10,0	75,0	12,8	1,5	18,0
FireFLY6 PRO	США	2015	1,5	3,8	64,8	4,5	1,0	7,5
Nimbus	Германия	2016	1,8	3,4	126,0	6,0	1,3	5,3
DeltaQuad Pro	Нидерланды	2017	2,4	3,3	100,0	6,2	3,0	9,0
WELKIN-F4	Китай	2017	3,5	30,0	108,0	35,0	8,0	60,0
Kwt-Gx350	Китай	2018	3,5	8,1	110,0	14,4	4,0	10,0
WELKIN-F6	Китай	2018	2,2	4,5	90,0	5,0	1,5	5,0
CL-10	Китай	2019	2,3	10,8	80,0	12,0	1,7	8,9
CL-11	Китай	2019	3,6	20,0	120,0	25,0	2,0	25,8
CL-12	Китай	2019	2,2	7,0	80,0	8,0	1,3	3,0
CL-8	Китай	2019	3,2	5,0	90,0	25,0	3,0	21,5
CL-850	Китай	2019	3,8	40,0	140,0	50,0	5,0	40,0
Great Shark 330	Китай	2019	3,3	6,4	93,6	20,0	2,5	9,0
MUGIN 4000								
VTOL	Китай	2019	4,0	8,3	112,0	30,0	4,0	6,5
MUGIN EV350								
VTOL	Китай	2019	3,5	6,2	108,0	22,0	3,0	6,5
Mugin-2 PRO								
2930	Китай	2019	2,9	7,1	120,0	25,0	1,5	6,0
Mugin-3 PRO								
3000	Китай	2019	3,0	8,1	120,0	25,0	2,0	6,5
Mugin-3 Pro								
3600mm	Китай	2019	3,6	12,0	160,0	40,0	3,0	7,0
Mugin-4 Pro	Китай	2019	4,0	8,3	112,0	30,0	2,0	6,5

Источник: авторская разработка по данным [5, 9, 17, 18].

Их цена и технические характеристики сравнивались с аналогичными показателями БПЛА с фиксированным крылом той же размерности (всего 32 модели производства AeroVironment, Lockheed Martin (все – США), Elbit Systems (Израиль), Aeromaо (Канада), Геоскан (Россия) и др., первый полет которых осуществлялся в период 2001-2019 гг.).

Для группы гибридных БПЛА длина аппаратов находится в диапазоне от 0,83 до 2,6 м, размах крыла – от 0,83 до 4 м, максимальная взлетная масса – от 1,27 до 50 кг, максимальная скорость горизонтального полета – от 64,8 до 160 км/ч, продолжительность полета – от 0,33 до 8 ч.

Беспилотные летательные аппараты с фиксированным крылом имеют следующие технические характеристики: длина – от 0,72 до 2,55 м, размах крыла – от 1,1 до 4 м, максимальная взлетная масса – от 1,5 до 30 кг, максимальная скорость горизонтального полета – от 40 до 160 км/ч, продолжительность полета – от 0,75 до 20 ч.

Для каждой группы БПЛА был введен комплексный показатель технического уровня (CL), км·кг [16]:

$$CL = x_1 x_2 x_3,$$

где x_1 – максимальная скорость, км/ч; x_2 – продолжительность полета, ч; x_3 – максимальная взлетная масса, кг.

Этот показатель положительно коррелирован с размахом крыла модели, при этом увеличение размаха крыла для группы гибридных БПЛА ведет к более значительному росту комплексного показателя технического уровня по сравнению с БПЛА с фиксированным крылом (рис. 1). Среднее значение комплексного показателя технического уровня гибридных БПЛА более чем в два раза превышает аналогичный показатель для БПЛА с фиксированным крылом (7688 и 3141 соответственно).

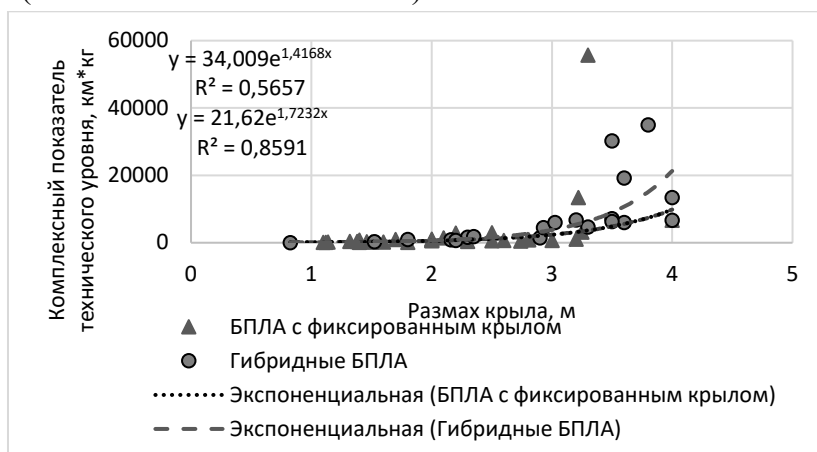


Рис. 1. Зависимость показателя технического уровня от размаха крыла для двух групп БПЛА

Источник: авторская разработка по данным [5, 9, 17, 18].

Для каждой группы БПЛА была построена модель логарифма цены аппарата (Y) в зависимости от продолжительности его полета (x_2) и отношения массы аппарата к размаху крыла (x_4). Так как БПЛА с фиксированным крылом производились в большем временном периоде, для них в модель введен показатель года первого полета БПЛА (T_0) (здесь и далее все t -статистики значимы, p -значения $< 0,05$):

$$\log(Y^{FW}) = 6,83 + 0,08x_2 - 0,41x_4 - 0,2(T_0 - 2000), R^2 = 0,81,$$

$$\log(Y^H) = 1,1 + 0,22x_2 + 0,16x_4, R^2 = 0,65.$$

Здесь индекс FW относится к БПЛА с фиксированным крылом, H – к гибридным БПЛА. Для каждой группы выявлена положительная корреляция между логарифмом цены и максимальной продолжительностью полета, для БПЛА с фиксированным крылом происходит снижение цены с течением времени, а отношение массы пустого аппарата к размаху крыла отрицательно коррелировано с логарифмом цены для БПЛА с фиксированным крылом и положительно – для гибридных БПЛА.

Развитие гибридных БПЛА идет в направлении увеличения размаха крыла, его максимальной взлетной массы и продолжительности полета модели.

Далее была построена модель зависимости логарифма удельной цены БПЛА (отношение цены к показателю технического уровня, Y/CL) от размаха крыла (x_2) и от времени $t = T_0 - 2000$:

$$\log(Y_{CL}^{FW}) = 1,6 - 1,05x_2 - 0,18t, R^2 = 0,63,$$

$$\log(Y_{CL}^H) = 1,67 - 0,78x_2 - 0,3t, R^2 = 0,78,$$

где Y_{CL} – удельная цена БПЛА.

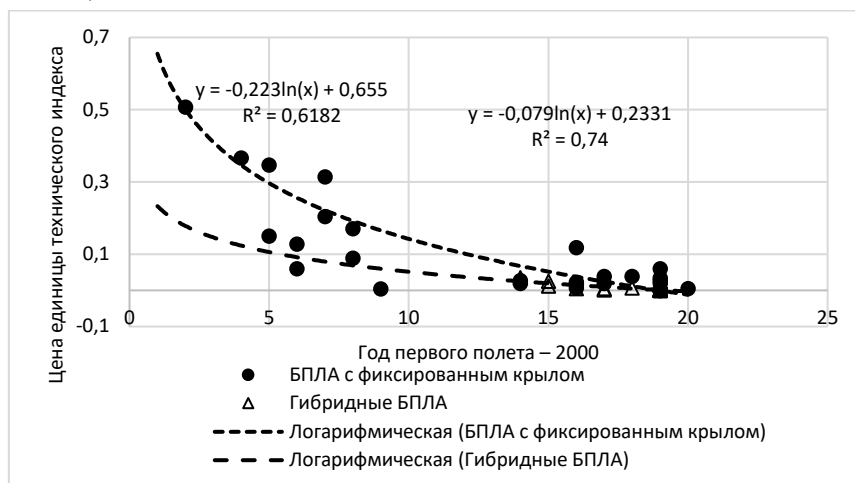


Рис. 2. Динамика цены единицы комплексного показателя технического уровня гибридных БПЛА и БПЛА с фиксированным крылом

Источник: авторская разработка по данным [5, 9, 17, 18].

Для каждой группы БПЛА получено, что логарифм удельной цены снижается с увеличением размаха крыла и со временем первого полета модели. При этом цена единицы комплексного показателя технического уровня гибридных БПЛА ниже, чем у БПЛА с фиксированным крылом, что свидетельствует об эффективности аппаратов того типа (рис. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для гибридных БПЛА типа конвертоплана и БПЛА с фиксированным крылом получено, что логарифм их удельной цены снижается с увеличением размаха крыла и со временем первого полета модели, но при этом цена единицы комплексного показателя

технического уровня гибридных БПЛА ниже, чем у БПЛА с фиксированным крылом, что свидетельствует об эффективности аппаратов этого типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Federation of Robotics. Service Robots: Provisional Definition of Service Robots. URL: <https://ifr.org/service-robots>.
2. Saeed A.S., Younes A.B., Cai Ch., Cai G. (2018). A Survey of Hybrid Unmanned Aerial Vehicles // Progress in Aerospace Sciences. Volume 98, April 2018, pp. 91-105. doi: 10.1016/j.paerosci.2018.03.007.
3. Абдуллаев А.А. Тенденция развития беспилотных летательных аппаратов конвертопланового типа // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 63 (1). С. 84–90. doi: 10.18411/lj-07-2020-21
4. Красноперов Р., Фетисов В., Неугодникова Л., Адамовский В. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние. – Уфа: ФОТОН, 2014. – 217 с.: ил. URL: <https://www.libfox.ru/560561-vladimir-fetisov-bespilotnaya-aviatsiya-terminologiya-klassifikatsiya-sovremennoe-sostoyanie.html>.
5. Hassanalian M., Abdelkefi A. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review // Progress in Aerospace Sciences, 91 (2017), P. 99–131. doi: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003>.
6. Cetinsoy E et al. Design and construction of a novel quad tilt-wing UAV // Mechatronics, Volume 22, Issue 6, 2012, P. 723-745. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2012.03.003>.
7. Kuhn B. VTOL Takes Off. URL: <https://insideunmannedsystems.com/vtol-takes-off/> (дата обращения: 03.08.2020).
8. The Remotely Piloted Systems Info Space: Global Perspective. URL: <https://rps-info.com/publications/flipping-books-current-previous-editions/> (дата обращения: 08.08.2020).
9. FireFLY6 PRO URL: <https://www.birdseyeview.aero/pages/firefly6-pro> (дата обращения: 08.08.2020).
10. ZALA 421-16EVHD. URL: <https://zala-aero.com/production/bvs/konvertoplan-zala-421-16ev-vtol-hd/> (дата обращения: 20.08.2020).
11. Korean Aerospace Research Institute. UAV R&D. URL: https://www.kari.re.kr/eng/sub03_01_01.do (дата обращения: 21.07.2020).
12. Fixed-wing VTOL UAV Market by Vertical (Military, Government & Law Enforcement, Commercial), Propulsion (Electric, Hybrid, Gasoline), Mode of operation (VLOS, EVLOS, BVLOS), Endurance, Range, MTOW, and Region – Global Forecast to 2030. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/fixed-wing-vtol-uav-market-173456250.html> (дата обращения: 09.08.2020).
13. Yu S., Heo J., Jeong S., Kwon Y. (2016) Technical Analysis of VTOL UAV. Journal of Computer and Communications, 4, 92-97. doi: <http://dx.doi.org/10.4236/jcc.2016.415008>
14. Norwegian government saves time and money on road surveys with VTOL drone data [ROI study]. URL: https://wingtra.com/case_studies/road-surveys-with-vtol-drone-data/ (дата обращения: 18.08.2020).
15. «РН-Пурнефтегаз» внедрил беспилотник для мониторинга промысловых трубопроводов. URL: <http://oilgascom.com/rn-purneftegaz-vnedril-bespilotnik-dlya-monitoringa-promyslovyx-truboprovodov/> (дата обращения – 20.07.2020).
16. Дубинина М.Г. Анализ технико-экономических показателей профессиональных квадрокоптеров // Научно-практический журнал «Концепции». – Москва. – №1(38). – 2019. – С.27-35. doi: 10.34705/KO.2019.14.39.003.
17. Catalogue of UAV. URL: <https://china-nai.ru/upload/iblock/ae8/ae89653fb9f53b43ffba03ba0e60bbc1.pdf> (дата обращения: 06.09.2022).
18. Mugin UAV. URL: <https://www.muginuav.com/product-category/vtol-uav/> (дата обращения: 06.09.2022).

ГЛАВА 13.

АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КВАДРОКОПТЕРОВ

ВВЕДЕНИЕ

Среди беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) по конфигурации крыла выделяют БПЛА с фиксированным и вращающимся крылом. В свою очередь, конструкция БПЛА может иметь одно вращающееся крыло (БПЛА вертолетного типа), а может иметь несколько роторов. В зависимости от количества роторов выделяют трикоптеры (с 3 роторами), квадрокоптеры (4 ротора), гексакоптеры (6 роторов), октакоптеры (8 роторов) и прочие мультикоптеры (более 8 роторов) [1].

Мультироторные дроны характеризуются простотой конструкции, и благодаря своим компактным размерам и простоте управления, используются правоохранительными органами, коммерческими организациями и частными лицами для воздушной съемки, наблюдения и мониторинга, для освещения спортивных состязаний, экологической инспекции и других целей [2]. Разработчики этого вида БПЛА расширяют спектр возможных полезных нагрузок для этих аппаратов с целью увеличения сферы применения мультикоптеров.

Несмотря на огромные преимущества, рост рынка мультикоптеров сталкивается с некоторыми ограничениями из-за строгого регулирования воздушного пространства и проблем возможного нарушения конфиденциальности и безопасности. Кроме того, ограниченные бюджеты правоохранительных органов и нехватка квалифицированного персонала еще больше сдерживают рост этого рынка.

Среди всех мультикоптеров особое место занимают квадрокоптеры. Это наиболее простой вид компактных и маневренных аппаратов, в основе конструкции которых обычно лежит X-схема с 4-мя роторами, имеющими противоположные направления вращения, и 4-мя двигателями, придающими аппарату большую устойчивость от ветра. Для устойчивого полета квадрокоптера требуется блок инерциальных измерений с акселерометрами и гироскопами для обеспечения прямолинейного и углового движения, указаний направления и положения в воздухе. Сигналы спутника (обычно GPS) обеспечивают более точную навигацию в течение длительного периода времени. Записи внутренних и внешних датчиков дронов могут быть использованы для различных приложений. Авиационное оборудование обычно включает альтиметр и канал связи для получения команд навигации, целеуказания и передачи изображения. Управление квадрокоптерами может осуществляться как по радиоканалу (посредством передатчика и радиоприемника), так и по Wi-Fi с планшета или смартфона. Новые поколения квадрокоптеров имеют бесщеточные (бесколлекторные) моторы с высокой эффективностью.

По своей максимальной взлетной массе этот вид беспилотников обычно относится к типу мини- или микро-БПЛА. Профессиональные квадрокоптеры могут иметь диаметр основного ротора от 30 см до 1,6 м. Они имеют прочный корпус, что облегчает монтаж дополнительного оборудования, а также гарантирует устойчивость камеры и высокое качество съемки. Кроме того, профессиональные квадрокоптеры, в отличие от любительских,

обладают более высокой грузоподъемностью, улучшенной системой крепления полезных нагрузок, большей дальностью и временем полета, устойчивостью к ветру, наличием режима автоматического полета. Чаще всего они располагают двумя слотами для батарей (вторая является либо запасной, либо дополнительной), которые могут иметь функцию подогрева. Глава подготовлена на основе статьи автора*.

МИРОВОЙ РЫНОК ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КВАДРОКОПТЕРОВ

По оценкам консалтинговой компании BCG, к 2050 г. парк беспилотников в Европе и США будет оцениваться в 50 млрд долл. и составит более 1 млн ед., при этом большая часть добавленной стоимости от их использования будет получена за счет сбора данных и прочих услуг [3].

По оценкам BIS Research, на долю мультикоптеров в 2016 г. приходилось около 1,25 млрд долл. выручки [4]. Профессиональные квадрокоптеры активно применяются в сельском, лесном и водном хозяйстве, строительстве, энергетике, геодезии и других областях. На большинстве квадрокоптеров установлены камеры, которые могут использоваться как для управления полетом, так и для съемки объектов с воздуха. Эта возможность широко используется для создания, например, подробных 3D-моделей местности. Использование профессиональных квадрокоптеров для постоянного или периодического мониторинга объектов более выгодно по сравнению с платой за фотосъемку с вертолета или самолета. В строительстве в настоящее время около 90% коммерческого картографирования происходит с помощью квадрокоптеров и других беспилотников стоимостью менее 1500 долл. [5].

Некоторые профессиональные квадрокоптеры имеют узкую направленность. Например, модель Agras MG-1S компании DJI предназначена для сельского хозяйства и применяется для опрыскивания сельскохозяйственных угодий.

Самым известным производителем квадрокоптеров в мире является китайская компания DJI, на долю которой в 2017 г. приходилось около 70 % продаж (2,7 млрд долл.), из них более 80% составляли потребительские дроны [6]. В 2018 г. эта доля увеличилась до 74% [7]. На сегодняшний день линейка Phantom компании – это самые популярные гражданские беспилотники на рынке, широко используемые как любителями, так и профессионалами. Компания разработала собственное программное обеспечение для управления полетом, а также создала портативные стабилизаторы и профессиональные камеры для квадрокоптеров, которые занимают ведущие позиции на рынке. В настоящее время компания DJI инвестирует средства в исследования и разработки технологий следующего поколения, таких как машинное зрение, глубокое обучение и автономные системы управления. Выручка от продаж коммерческих беспилотников DJI составляет менее четверти доходов группы, но в отличие от большинства других китайских производителей беспилотников, которые продают большую часть своей продукции на внутреннем рынке, коммерческие продажи компании в основном ориентированы на зарубежные страны.

* Дубинина М.Г. Анализ технико-экономических показателей профессиональных квадрокоптеров // Научно-практический журнал «Концепции». 2019. № 1 (38). С. 27–35.

Кроме того, широко известны квадрокоптеры компаний Walkera, Yuneec, Hubsan (все – Китай), Parrot (Франция), Microdrone (Германия), Aeryon (Канада) и др.

В последнее время и в России появились подобные аппараты для гражданских целей. Это комплекс «Феникс», квадрокоптеры компаний «Коптер Экспресс», Armair, DroneStroy, «Геоскан», которые применяются для аэросъемки, мониторинга территорий, доставки медикаментов и почтовых отправок, в спасательных и аварийных работах. В конце 2018 г. квадрокоптеры компании «Геоскан» (Геоскан 401), по соглашению с правительством Москвы, поступили в распоряжение Росреестра для создания цифровых копий территорий в Новой Москве, промзонах столицы [8]. В 2018 г. компания поставила на рынок более 500 беспилотников, из которых 50 аппаратов – квадрокоптеры Геоскан 401 [9]. В 2018 г. компания объявила о создании новой модели квадрокоптера – Gemini, меньшего размера по сравнению с 401-й моделью, но имеющего все возможности для выполнения кадастровых работ и проведения электромагнитной съемки для геологоразведки. Компания «Геоскан» выпускает также программное обеспечение, которое позволяет обрабатывать данные, полученные с квадрокоптера, интегрировать их в различные геоинформационные системы. С помощью аппаратов «Геоскан» были созданы 3D-модели ряда городов, исследовались линии электропередач и состояние газопроводов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗВИТИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КВАДРОКОПТЕРОВ

Моделированию технико-экономических показателей различных видов техники (в том числе, робототехнических систем) посвящен ряд работ отечественных исследователей [10–15]. В данной статье будут рассмотрены две группы профессиональных квадрокоптеров (стоимостью до 10 тыс. долл. и стоимостью свыше 10 тыс. долл.), для которых будет рассмотрена динамика абсолютных и удельных показателей с выделением этапов и поколений развития. В первую группу вошли квадрокоптеры AR.Drone трех поколений компании Parrot; несколько поколений моделей Inspire, Phantom, Matrice компании DJI Innovation; Voyager 3 и 4 компании Walkera и др. (всего 26 моделей). Во вторую группу вошли модели компании Microdrone (Германия), две модели SkyRanger компании Aeryon (Канада), F50 и F100 компании AEE Technology (Китай) и др. (всего 12 моделей).

Малоразмерные профессиональные квадрокоптеры

Первая группа, малоразмерные профессиональные квадрокоптеры, используется в основном для картографирования, ведения профессиональной съемки, применяется в сельском хозяйстве, строительстве и в инспекции гражданской инфраструктуры. Для этой группы квадрокоптеров были выделены 4 поколения их развития. Первое поколение (2010–2013 гг.) имело малую продолжительность полета (10–20 минут), низкую скорость, слабую устойчивость к ветру и низкое качество съемки с помощью подсоединяемой видеокамеры (GoPro). Из всех возможных режимов полета был доступен только автовозврат на место старта (при потере связи на время, больше предустановленного, аппарат возвращается в точку запуска).

Во втором поколении (2013–2015 гг.) в ряде аппаратов появилась встроенная камера с HD-качеством съемки видео, улучшились системы стабилизации, управления и

связи, появились возможности задания предустановленного маршрута и удержания высоты, а также выбор «режима новичка» (Headless). Управление квадрокоптером осуществлялось через Wi-Fi, что ограничивало дальность полета моделей.

Третье поколение квадрокоптеров (2015–2017 гг.) перешло на съемку видео в качестве 4К, появилась функция облета вокруг объекта с помощью фиксирования GPS-координат, выбор «точки интереса» (концентрация внимания на конкретном объекте съемки), режим селфи (следование за объектом на определенной высоте и расстоянии), автоматический взлет и посадка, снижена вибрация при полете с помощью специального программного обеспечения, оптимизирующего обороты двигателя. Точность удержания положения по GPS для этого поколения квадрокоптеров составляет около 0,5 м по горизонтали и 2,5 м по вертикали.

Квадрокоптеры четвертого поколения (2016-2019 гг.) ведут съемку видео в качестве 4К как днем, так и ночью, имеют сканирующие камеры, позволяющие строить 3D-модель окружения и избегать столкновений при полете (при этом некоторые модели имеют датчики обнаружения препятствий по всем направлениям, кроме верха), они более устойчивы к погодным условиям за счет влагозащитной конструкции корпуса. Некоторые аппараты из этого поколения имеют высокоточную систему позиционирования и навигации (RTK), что позволяет достигать точности позиционирования в 1 см по горизонтали и 2 см по вертикали.

Для рассматриваемых моделей малоразмерных профессиональных квадрокоптеров диаметр ротора изменяется от 0,23 до 0,78 м, масса – от 0,38 до 3,25 кг, максимальная горизонтальная скорость – от 18 до 94 км/ч, причем для этих показателей наблюдается выраженный временной тренд (рис. 1).

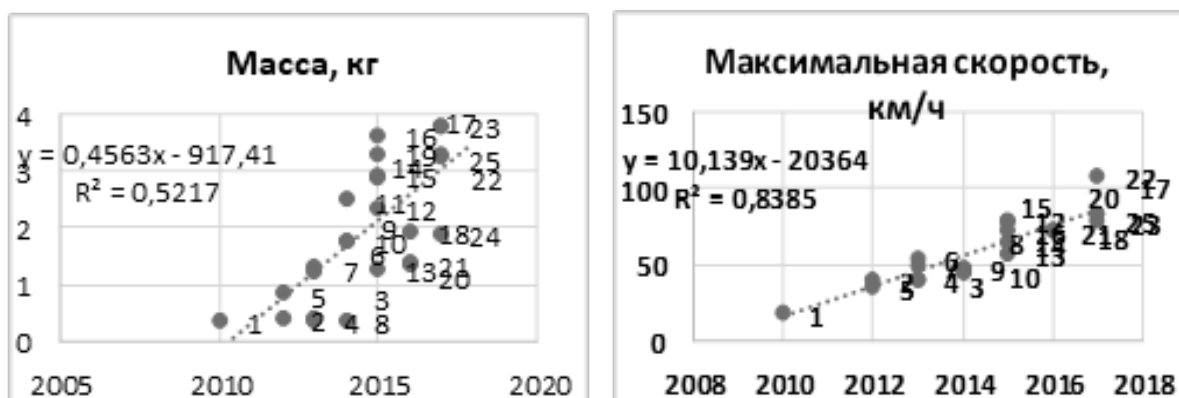


Рис. 1. Динамика массы и скорости малоразмерных профессиональных квадрокоптеров

Источник: авторская разработка по данным [17–19].

Важной характеристикой квадрокоптеров является продолжительность полета, которая во многом зависит от емкости установленной на нем батареи и массы самого аппарата. Для рассматриваемых малоразмерных профессиональных квадрокоптеров с увеличением максимальной взлетной массы происходит уменьшение удельной емкости батареи аккумулятора в расчете на 1 кг максимальной взлетной массы (рис. 2).

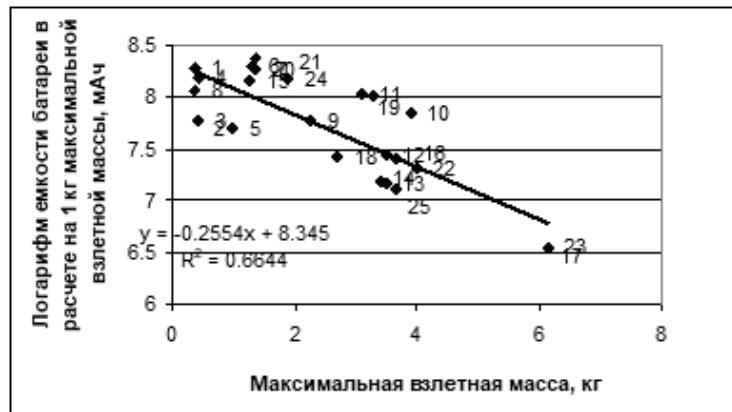


Рис. 2. Динамика логарифма удельной энергоёмкости малоразмерных профессиональных квадрокоптеров

Источник: авторская разработка по данным [17–19].

Для рассматриваемых моделей квадрокоптеров максимальная скорость в горизонтальном направлении по поколениям увеличивается со временем и с увеличением максимальной взлетной массы. Коэффициенты зависимости от массы для разных поколений близки, но при этом каждое следующее поколение имеет базовое значение скорости выше предыдущего при том же значении массы (рис. 3).

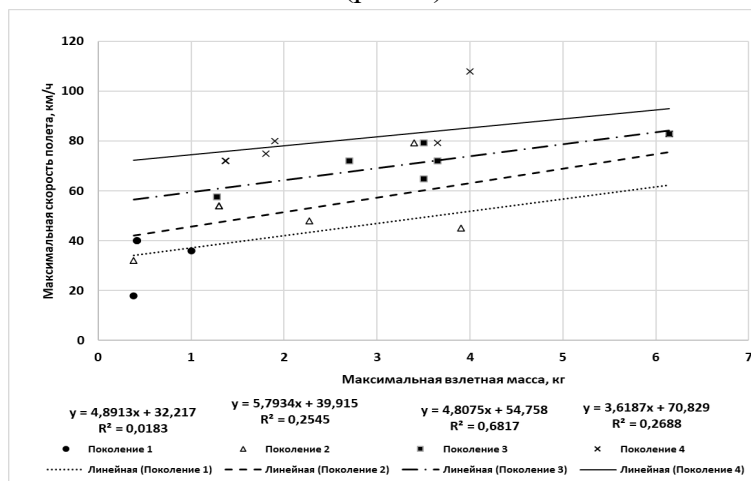


Рис. 3. Изменение скорости квадрокоптеров в зависимости от их массы по поколениям

Источник: авторская разработка по данным [17–19].

Для этой группы квадрокоптеров был определен комплексный показатель технического уровня (XI):

$$XI = x_1 x_2 x_3,$$

где x_1 – максимальная скорость, x_2 – продолжительность полета, x_3 – максимальная взлетная масса. На рис. 4 представлена динамика среднего значения этого комплексного показателя по годам.

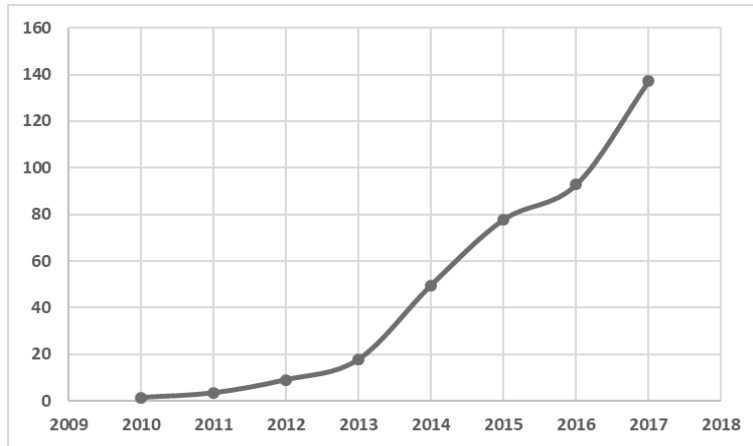


Рис. 4. Динамика комплексного показателя технического уровня малоразмерных профессиональных квадрокоптеров

Источник: авторская разработка по данным [17–19].

Далее была построена модель, описывающая зависимость логарифма емкости аккумулятора в расчете на единицу комплексного показателя технического уровня от этого комплексного показателя, времени и поколения квадрокоптеров (в скобках здесь и далее – t -статистики):

$$\ln(y/XI) = -0,009 X_i - 0,29(t - 2009) + 0,23 g_2 + 0,24 g_3 + 0,64 g_4 + 6,63, \quad R^2 = 0,895,$$

(-5,5)
(-3,2)
(0,9)
(1,8)
(2,4)
(23,0)

где y – емкость батареи (мАч), X_i – комплексный показатель технического уровня (км·кг), g_i – фиктивная переменная, равная единицы, если модель отнесена к поколению i , t – год первого полета модели. Полученная модель свидетельствует, что емкость батареи квадрокоптеров в расчете на единицу комплексного показателя технического уровня (удельная емкость) снижается с ростом X_i и с течением времени, при этом базовое значение удельной емкости возрастает для каждого следующего поколения относительно предыдущего.

Модели цены. Анализ изменения цены рассматриваемой группы квадрокоптеров по поколениям выявил общий ее рост с увеличением комплексного показателя технического уровня (рис. 5). Получено, что для четвертого поколения квадрокоптеров рассматриваемой группы рост комплексного показателя технического уровня на единицу увеличивал цену аппарата на 25,5 долл., для остальных поколений – на 17–20 долл., при этом базовая стоимость моделей росла в 1,5–3 раза по отношению к предыдущему поколению.

Далее была построена модель цены квадрокоптера в зависимости от удельной емкости батареи, отнесенной к 1 кг максимальной взлетной массы, и от поколения следующего вида:

$$y = -1,8 \ln(x) + 1,1 g_2 + 2,2 g_3 + 4,4 g_4 + 14,9, \quad R^2 = 0,66,$$

(-3,6)
(1,3)
(2,0)
(4,6)
(2,7)

где y – цена квадрокоптера, тыс. долл.; x – емкость батареи в расчете на 1 кг максимальной взлетной массы, мАч/кг, g_i – фиктивная переменная, равная 1, если модель отнесена к поколению i . Получено, что по поколениям происходит увеличение базовой цены квадрокоптера, а с ростом энергопотребления в расчете на 1 кг максимальной взлетной массы происходит снижение цены.

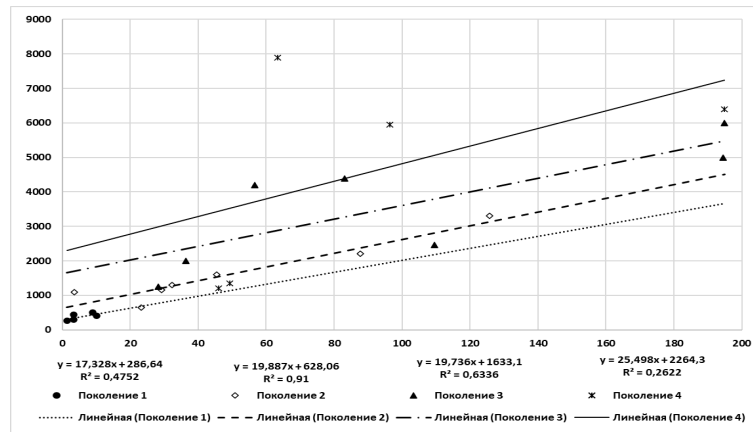


Рис. 5. Изменение цены малоразмерных профессиональных квадрокоптеров по поколениям в зависимости от комплексного показателя технического уровня

Источник: авторская разработка по данным [17–19].

Для характеристики парка квадрокоптеров были выбраны за образцы в каждом поколении Phantom 1–4 компании DJI, для них рассчитан комплексный показатель технической сложности моделей, и, в соответствии с методикой, изложенной в работе [16], рассчитывались значения $Q_j = Q_0 + T_j \sum \ln(x_{ij}/x_{0j})$, где Q_j – цена единицы изделия этапа j , T_j – показатель, характеризующий возрастающую сложность квадрокоптера при переходе от одного этапа к следующему, x_{0j} – характеристики базовой модели этапа j , x_{ij} – характеристики модели i на этапе j . В качестве характеристик моделей были выбраны максимальная скорость (x_{1j}), продолжительность полета (x_{2j}), максимальная масса полезной нагрузки (x_{3j}) и диаметр ротора (x_{4j}). Для базовых моделей получено, что $Q_{0j} = 0,074 (x_1 x_2 x_3 x_4)$, $R^2 = 0,98$; для каждого этапа рассчитаны коэффициенты технической сложности моделей по формуле: $Q_j = Q_0 + 0,13 T_j \sum \ln(x_{ij}/x_{0j})$. Получены значения: $T_1 = 1,0$, $T_2 = 4,74$, $T_3 = 18,0$, $T_4 = 25,3$, $R^2 = 0,89$.

КРУПНЫЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ КВАДРОКОПТЕРЫ

Вторая рассматриваемая группа квадрокоптеров состоит их моделей с диаметром ротора от 0,5 до 2 м, максимальной взлетной массой от 1 до 16 кг, с продолжительностью полета до 1,5 ч. Дальность полета может достигать 50 км, а его высота над уровнем моря – до 7 км. К этой группе отнесены модели md4-200, md4-1000 и md4-3000 компании Microdrones (Германия), F50 и F100 компании AEE Technology (Китай), SkyRanger R60 и R70 компании Aeryon (Канада), Vanguard и Falcon X4 компании Airborne Sentinel (ЮАР), CyberQuard компании Sci Aero (Австралия), Voyager 5 компании Walkera (Китай) и Геоскан 401 (Россия). Квадрокоптеры из этой группы используются в промышленности, строительстве, сельском хозяйстве, геодезии и многих других областях для выполнения задач в области наблюдения, съемки, поиска, связи, для доставки грузов и т.д. Они могут быть оснащены инфракрасной видеокамерой и вести съемку в любое время суток и при любых погодных условиях. Некоторые модели способны выдержать порывы ветра до 65–72 км/ч.

Модульная концепция полезной нагрузки позволяет гибко адаптировать квадрокоптеры к предполагаемой цели. Они обычно оснащены цифровыми или

многоспектральными камерами, могут иметь системы 3D-лазерного сканирования, обнаружения газа, ретрансляции сигналов воздушной связи и др. Эти квадрокоптеры могут работать в автоматическом режиме с помощью задания маршрута по координатам GPS. Программное обеспечение позволяет оператору задавать траектории полета с указанием определенных областей или препятствий, которые необходимо избегать, устанавливать границы и указывать высоту и скорость полета, программировать режимы обхода точки или зависания над установленным местом. Некоторые квадрокоптеры из выборки снабжены функцией «черный ящик», т.е. сохраняют полетные данные в энергонезависимой памяти.

Для этой группы квадрокоптеров не выделялись поколения, а рассматривались изменения их технико-экономических показателей во времени. Основные показатели представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технико-экономические показатели крупных квадрокоптеров

№ п/п	Модель	Компания	Год выпуска	Скорость, км/ч	Максимальная взлетная масса, кг	Время полета, ч	Полезная нагрузка, кг	Цена, тыс. долл.
1	Md4-200	MicroDrones	2006	28,8	1,1	0,30	0,2	12,7
2	Md4-1000	MicroDrones	2009	43,2	4,8	0,67	1,2	14,4
3	F50	AEE Technology	2011	25,0	2,0	0,67	0,8	37,0
4	SkyRanger R60	Aeryon	2013	60,0	5,0	0,83	0,7	65,0
5	F100	AEE Technology	2014	100,0	7,6	1,00	2,5	58,0
6	Геоскан 401	Геоскан	2014	50,0	9,3	1,00	2,5	24,5
7	CyberQuard	Sci Aero	2015	59,8	2,5	0,42	0,8	37,0
8	Vanguard	Airborne Sentinel	2016	64,8	10,5	1,57	2	40,0
9	Voyager 5	Walkera	2017	72,0	5,5	0,68	3	18,0
10	Falcon X4	Airborne Sentinel	2017	54,0	4,5	0,83	0,5	25,0
11	MD4-3000	MicroDrones	2018	72,0	16,0	0,75	5	52,0
12	SkyRanger R70	Aeryon	2018	70,0	8,5	1,10	2	70,0

Источник: [20–23].

Проведенный анализ показал, что все технические показатели этой группы квадрокоптеров увеличивались со временем (рис. 6).

Как и для малоразмерных профессиональных квадрокоптеров, для этой группы получена положительная корреляция между скоростью (Y) и максимальной взлетной массой (x):

$$Y = 2,7x + 41, \quad R^2 = 0,31.$$

(2,1) (4,2)

Следует отметить, что для малоразмерных профессиональных квадрокоптеров увеличение массы на 1 кг приводило к большему увеличению скорости, чем для второй группы (7,5 и 2,7 км/ч соответственно).

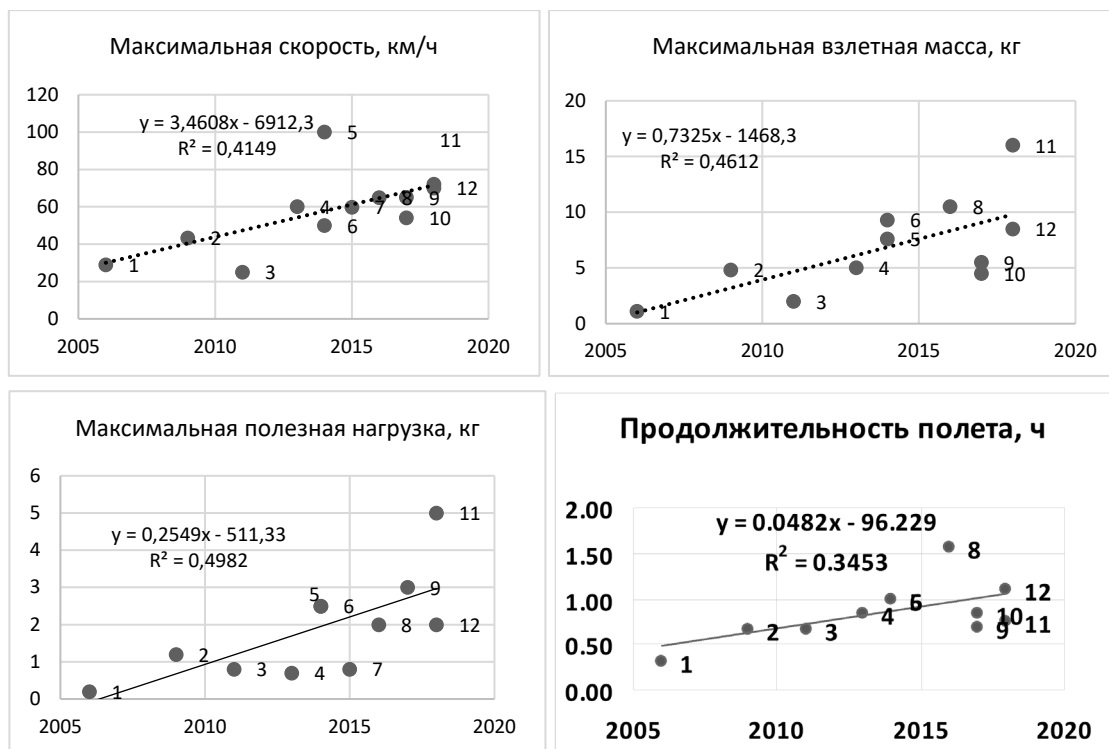


Рис. 6. Динамика основных технических характеристик крупных профессиональных квадрокоптеров

Источник: авторская разработка по данным [20–23].

Для второй группы квадрокоптеров рассчитан комплексный показатель технического уровня (X_{II}) следующего вида:

$$X_{II} = x_1 x_2 x_3,$$

где x_1 – максимальная скорость, x_2 – продолжительность полета, x_3 – максимальная полезная нагрузка (рис. 7).

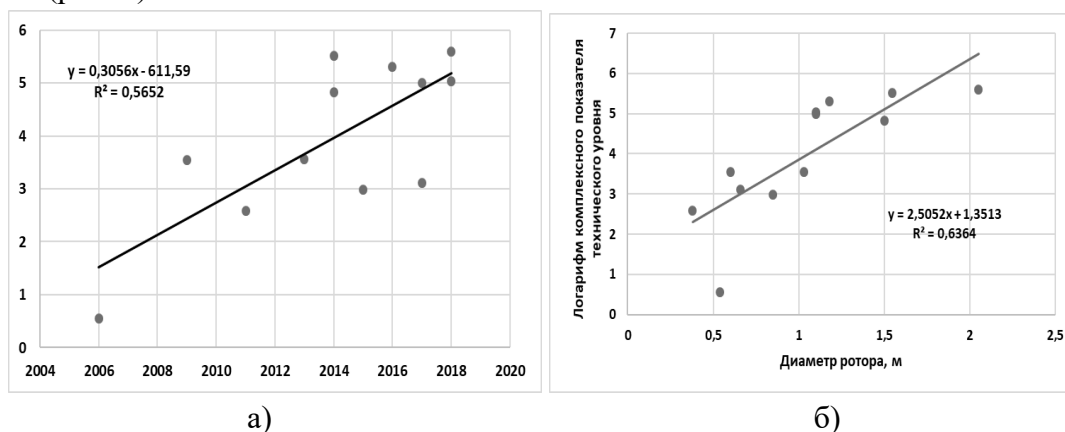


Рис. 7. Изменение логарифма комплексного показателя технического уровня крупных профессиональных квадрокоптеров от времени (а) и от диаметра ротора (б)

Источник: авторская разработка по данным [20–23].

Для логарифма удельной цены квадрокоптера в расчете на единицу комплексного показателя технического уровня получена следующая зависимость:

$$\ln(x/y) = -0,011 X_{II} + 7,58, \quad R^2 = 0,65,$$

(–4,3) (21,2)

где y – цена квадрокоптера, долл.; X_{II} – комплексный показатель технического уровня. Таким образом, для крупных профессиональных квадрокоптеров выявлена отрицательная корреляция между удельной ценой и комплексным показателем технического уровня.

Цена квадрокоптеров этой группы (Y) также значимо зависит от показателя максимально допустимой скорости ветра, при которой возможен полет (x):

$$Y = 0,8 x + 7,3, \quad R^2 = 0,64.$$

(4,2) (0,9)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования показывают, что развитие малоразмерных профессиональных квадрокоптеров направлено в сторону увеличения максимальной взлетной массы, скорости полета, а также уменьшения показателя мощности на единицу максимальной взлетной массы. При этом выявлена положительная корреляция скорости, дальности полета и емкости батарей с максимальной взлетной массой. Получено, что цена и удельная цена малоразмерного профессионального квадрокоптера снижается с ростом емкости батареи в расчете на 1 кг максимальной взлетной массы, цена по поколениям возрастает с ростом комплексного показателя технического уровня.

Развитие крупных профессиональных квадрокоптеров направлено на увеличение продолжительности, дальности и скорости полета, при этом отношение грузоподъемности к максимальной взлетной массе меняется незначительно. Развитие квадрокоптеров направлено на снижение их веса за счет снижения массы аккумуляторов. Однако, по мнению специалистов, потребность большей грузоподъемности, скорее всего, приведет к совершенствованию конструкции этих аппаратов в сторону перехода на шестироторные схемы, а не к разработке более крупных квадрокоптеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерохин Е., Коломиец А. Мультикоптеры: новый вид. URL: <http://ufology-news.com/u/39779988/ufology-news/files/multicopters.pdf> (дата обращения: 09.01.2022).
2. Multirotor Drones Market: Global Industry Analysis and Forecast 2015–2021. URL: <https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/multirotor-drones-market.asp> (дата обращения: 09.01.2022).
3. Castellano F. Commercial Drones Are Revolutionizing Business Operations. URL: <https://www.toptal.com/finance/market-research-analysts/drone-market> (дата обращения: 09.01.2022).
4. Global Multi-Rotor Drone Market – Analysis and Forecast 2016-2022 – BIS Research, April 2017. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-multi-rotor-drone-market---analysis-and-forecast-2016-2022-focus-on-major-applications-payloads-and-pricing-300439017.html> (дата обращения: 09.01.2022).
5. 2018 Commercial Drone Industry Trends. – DroneDeploy, May 2018. URL: https://dronedeploy-www.cdn.prismic.io/dronedeploy-www%2Fae535fda-dfc9-4bcf-9743-292df714e9fe_dd__2018_trends_report-f.pdf (дата обращения: 09.01.2022).
6. World's top drone seller DJI made \$2.7 billion in 2017. URL: <https://technode.com/2018/01/03/worlds-top-drone-seller-dji-made-2-7-billion-2017/> (дата обращения: 09.01.2022).
7. DJI Market Share: Here's Exactly How Rapidly It Has Growth in Just a Few Years. URL: <http://thedronegirl.com/2018/09/18/dji-market-share/> (дата обращения: 09.01.2022).

8. Ассоциация «Аэронет». Беспилотники Геоскан будут регистрировать кадастровые нарушения в Москве. URL: <https://aeronet.aero/achievements/271722> (дата обращения: 09.01.2022)
9. Авиапорт. URL: <https://www.aviaport.ru/news/2019/01/09/570129.html> (дата обращения: 09.01.2022).
10. Варшавский А.Е. Научно-технический прогресс в моделях экономического развития. М.: Финансы и статистика, 1984.
11. Дубинина М.Г., Макарова Ю.А. Анализ технико-экономических показателей беспилотных транспортных средств // Научно-практический журнал «Концепции». 2018. № 1 (37). С. 28–44.
12. Варшавский А.Е., Дубинина В.В. Основные тенденции изменения технико-экономических показателей промышленных роботов // «Национальные интересы: приоритеты и безопасность». 2018. Т. 14. Вып. 10. С. 1916–1935.
13. Дубинина М.Г. Анализ показателей развития роботов для дуговой сварки (по поколениям) // Анализ и моделирование экономических и социальных процессов. Т. 2. Вып. 25. НИЦ Регулярная и хаотическая динамика М.–Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2018. С. 88–96.
14. Дубинина М.Г. Анализ технико-экономических показателей БПЛА гражданского назначения в странах ЕС // Анализ и моделирование экономических и социальных процессов: Математика. Компьютер. Образование. 2016. Т. 23. № 4. С.181–189.
15. Комкина Т.А., Яркин А.П. Особенности использования бионики в медицинской робототехнике // Научно-практический журнал «Концепции». 2018. № 1 (37). С. 45–52.
16. Varshavsky A.E. A Methodology for Comparing Military Potentials: the Case of Combat Aircraft/ Ch.18, pp. 241-251 / «Military Technological Innovation and Stability in a Changing World», ed. W.Smit, J.Grin, L.Voronkov. VU University Press, Amsterdam, 1992, 314 p.
17. Parrot. URL: <https://www.parrot.com/en> (дата обращения: 06.09.2022).
18. DJI. URL: <https://www.dji.com/ru> (дата обращения: 05.09.2022).
19. Walkera. URL: <https://www.walkera.com/> (дата обращения: 06.09.2022)
20. Microdrones. URL: <https://www.microdrones.com/en/> (дата обращения: 09.01.2022).
21. Aeryon SkyRanger sUAS. URL: <https://www.airforce-technology.com/projects/aeryon-skyranger-suas/> (дата обращения: 09.01.2022).
22. ГК Геоскан URL: <https://www.geoscan.aero/ru/products> (дата обращения: 09.01.2022).
23. Топ 10 самых дорогих квадрокоптеров в мире. URL: <https://zen.yandex.ru/media/id/5f395a7060f41271dc1df2a0/top-10-samyh-dorogih-kvadrokoptero-v-mire-5f3ab4a854a88a29acd5e730> (дата обращения: 09.01.2022)

ГЛАВА 14.

РОБОТИЗИРОВАННЫЕ ХИРУРГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

ВВЕДЕНИЕ

Роботизация медицины происходит значительными темпами [1, 2]. В мировой медицинской практике нашли широкое применение различные типы роботов: для восстановительной медицины и реабилитации; для жизнеобеспечения; для диагностики, терапии и хирургии [3]. В настоящее время наиболее быстро растущим сегментом являются роботы для проведения хирургических операций. Роботизированная хирургия – это один из видов минимально инвазивной хирургии (MIS). Применение таких систем позволило за счет повышения точности движений значительно уменьшить длину разрезов и послеоперационный болевой синдром, кровопотерю во время операции и ускорить послеоперационную реабилитацию. Первоначально данная разработка предназначалась для применения в опасных условиях (при повышенной радиации, в космосе), позволяя медперсоналу находиться вне опасной зоны. Глава подготовлена на основе статьи*.

МИРОВОЙ РЫНОК МЕДИЦИНСКИХ РОБОТОВ

Объём продаж медицинской робототехники составил в 2020 г. в стоимостном выражении 55% от общего оборота роботов для профессиональных услуг и увеличился за год на 11% до 3,6 млрд долл. При этом они характеризуются наиболее высокой средней ценой среди сервисных роботов, равной примерно 1 млн долл. (с учетом необходимых принадлежностей и обслуживания), так как роботизированные хирургические устройства являются самым дорогим типом в этом сегменте [4, 5]. По этой причине широкое применение получили лизинговые контракты на данный вид роботов. Следует отметить, что в 2013 г. продажи медицинских роботов составили 1294 ед., в 2014 г. данный показатель незначительно снизился – 1224 ед. В 2017 г. продано около 2000 ед., что на 23% больше, чем в 2016 г. [6] (см. рис. 1).

В 2021–2023 гг., по прогнозам аналитиков, продажи роботизированных систем, используемых в здравоохранении, а также аксессуаров для них, будут расти и составят 12,6 млрд долл. к концу 2023 г.

Основными направлениями роста продаж хирургических систем являются страны со слабо развитыми рынками, но при этом финансово привлекательными для производителей – это страны Азиатско-Тихоокеанского региона, Латинской Америки, Ближнего Востока и Африки [7]. Эксперты Research and Markets отмечают двузначный рост на мировом рынке роботизированных хирургических систем и ожидают, что в период 2016–2024 гг. выручка на нем увеличится почти втрое. Рынок мировых хирургических роботизированных систем в 2014 г. оценивался величиной 3,3 млрд долл. (около половины рынка хирургических роботизированных систем приходилось на операции в гинекологии и урологии) [8].

* Комкина Т.А., Яркин А.П. Особенности развития и распространения медицинской робототехники (на примере роботизированных хирургических систем) // Научно-практический журнал «Концепции». 2019. № 1 (38). С. 17–26. DOI: 10.34705/КО.2019.12.16.002

В 2016 г. данный показатель составил около 5,2 млрд долл., в 2020 г. размер мирового рынка хирургических роботов оценивался в 6,1 млрд долл. и, по прогнозам [9], достигнет 22,27 млрд долл. к 2028 г., увеличившись в среднем на 17,6% в период с 2021 по 2028 г. Растущие потребности в автоматизации и спрос на минимально инвазивную хирургию являются основными факторами роста рынка [10]. По прогнозам экспертов, ортопедические операции будут наиболее быстро растущим сегментом на хирургическом рынке роботизированных систем в течение прогнозируемого периода; предполагается, что Азиатско-Тихоокеанский регион будет одним из наиболее быстро растущих рынков (среднегодовой темп роста составил 15,9% в 2015–2020 гг.).

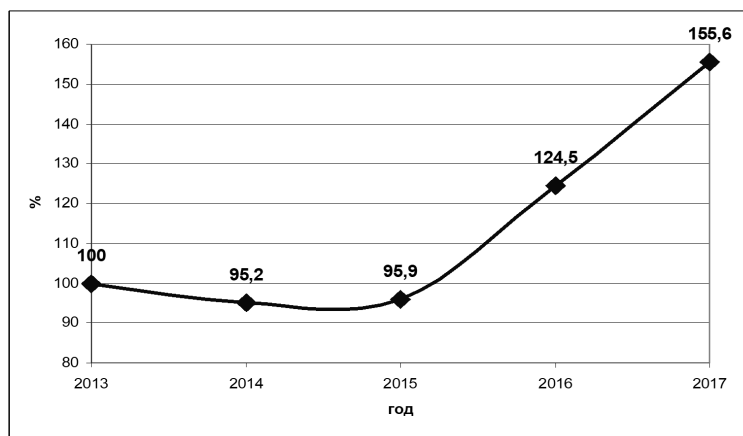


Рис. 1. Продажи медицинских роботов в мире, 2013–2017 гг. (2013 г. = 100%)

Источник: расчет по данным [4].

По некоторым оценкам объем глобального рынка хирургических роботов и ассистивных систем достигнет 98 млрд долл. к 2024 г., среднегодовой темп прироста составит порядка 8,4% [4]. Основными участниками мирового рынка хирургических роботизированных систем являются: Intuitive (США, ранее Intuitive Surgical Inc.), Stryker Corporation (США), Mazor Robotics (Израиль, имеет дочерние структуры в штате Флорида, США и Мюнстере, Германия), Hansen Medical Inc. (США), Accuray Inc. (США), MedRobotics (США), Renishaw plc (Великобритания), TransEnterix Inc. (США), Think Surgical (США), Synaptive Medical (Канада).

Лидером на рынке роботизированной хирургии долгое время остается американская компания Intuitive (основана в 1995 г.), которая совместно с дочерними предприятиями занимается разработкой, производством и сбытом хирургических роботизированных систем da Vinci; число установленных систем в мире в настоящее время составило более 4986 ед. (по данным 2018 г.). Представляется целесообразным рассмотреть особенности развития и распространения роботизированных хирургических систем на примере данной компании.

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ХИРУРГИЧЕСКОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ DA VINCI

Роботизированная система da Vinci применяется в следующих областях: урология (простатэктомия, резекция почки, нефрэктомии и др.); общая хирургия (фундопликация по

Ниссону, миотомия по Хеллеру, эзофагэктомия, бариатрическая хирургия, холецистэктомия, колоректальная хирургия); гинекология (тубо-тубарный анастомоз, миомэктомия, гистерэктомия, сакрокольпопексия, рак матки, рак шейки матки, хирургия яичников и лечение эндометриоза); торакальная хирургия (лобэктомия легкого при мелкоклетчатом раке, сегментэктомия, билобэктомия, краевая резекция, резекция средостения); эндокринологические вмешательства (роботическая тиреоидэктомия, тимэктомия, адреналэктомия); ЛОР-хирургия (рак корня языка, ларингэктомия, тимэктомия); кардиологическая хирургия (реваскуляризация левой передней нисходящей коронарной артерии, замена митрального клапана).

В высокотехнологичный комплекс хирургической системы da Vinci входят консоль хирурга, консоль пациента, консоль видео обзора, инструменты EndoWristR. Консоль пациента имеет четыре манипулятора (один снабжен эндоскопом для обзора операционного поля, на остальных устанавливаются хирургические инструменты). Консоль позволяет хирургу управлять тремя инструментами и эндоскопом. Рабочее место хирурга представляет собой пульт управления роботизированной консолью пациента, движения рук и пальцев хирурга масштабируются системой (1,5:1, 2:1, 3:1) и передаются на инструменты (точность перемещения инструментов в 5 раз выше предельной точности человеческой руки) [11]. Консоль видео обзора выполнена в виде отдельной стойки (включает аппаратное и программное обеспечение для обработки информации, широкоформатный сенсорный монитор). Хирургическая система da Vinci может быть укомплектована обучающим симулятором для виртуальной имитации операции.

Можно выделить следующие преимущества использования хирургической системы da Vinci: хирург имеет возможность получать трехмерное стереоизображение с возможностью масштабирования; 3D-изображение и интерфейс пульта дают возможность проведения хирургических манипуляций с высокой точностью и минимальным травмированием тканей и соседних органов; снижается кровопотеря (как правило, не требуется переливание крови); операция может проводиться амбулаторно (процесс восстановления проходит за несколько дней); высокий косметический эффект (операция идет через проколы около 1 см); большую степень свободы хирургических инструментов (по сравнению с человеческой рукой); хирург имеет возможность сидеть (соответственно меньше устает при длительных операциях), а также снижается усталостный тремор рук. По результатам исследования [12], операции по удалению простаты, выполненные с помощью роботов da Vinci, приводили к меньшему числу осложнений (10,6%), чем операции, выполненные без применения роботизированных систем (17,9%), при этом средняя длительность госпитализации снижалась на 1,5 дня, число переливаний снижалось на 14,8 п.п., среднее время операции увеличивалось на 1,2 часа (см. табл. 1). В исследовании принимали участие 3739 хирургов в более чем 300 больницах США. Разработчики системы особое внимание уделяют таким показателям, как длительность операции и время задержки в канале связи. За период 2001–2014 гг. средняя длительность различных операций снизилась с 420 до 120–180 мин., время задержки в канале связи снизилось с 400 до 66 мс.

Следует отметить и недостатки хирургической системы da Vinci: высокая стоимость системы (от 1,5 млн до 4 млн долл. в зависимости от комплектации); высокая стоимость расходных материалов; невозможность использования в некоторых видах операций в связи с тем, что точность движений робота – от 500 мкм; сложность стерилизации системы

(может приводить к внутриоперационному инфицированию пациентов, вызывая послеоперационные осложнения); безопасность и этические проблемы применения (см. [2]).

Таблица 1

Данные по исследованию открытой и роботизированной методики операций радикальной простатэктомии с использованием Da Vinci (2004–2010 гг., число операций – 71 312)

Показатели	Открытая хирургия простаты (нероботизированная больница)	Открытая хирургия простаты (роботизированная больница)	Роботизированная хирургия простаты
Среднее время операции, час	3,2	3,4	4,4
Средняя длительность госпитализации, дни	3,7	3,4	2,2
Число переливаний	17,1% (<i>n</i> = 2360)	11,5% (<i>n</i> = 3449)	2,3% (<i>n</i> = 638)
Общее число осложнений	17,9% (<i>n</i> = 2474)	15,8% (<i>n</i> = 4759)	10,6% (<i>n</i> = 2892)

Источник: [12].

Данная роботизированная хирургическая система позволила расширить и усовершенствовать новый хирургический подход МИХ (минимально инвазивная хирургия). В настоящее время можно выделить 7 поколений хирургической системы da Vinci за период 2001–2019 гг., отличающиеся по системе обзора InSite, комплектацией запатентованных инструментов EndoWrist, эргономикой и видом консолей: da Vinci Surgical System Population (1999–2005 гг.), da Vinci S Systems (2005–2015 гг.), da Vinci Si Systems (2009–2015 гг.), da Vinci Xi Systems (2014–2015 гг.), da Vinci X Systems (2017–2019 гг.), da Vinci SP Systems (2017–2018 гг.) (см. табл. 2.). В последних моделях рассматриваемых хирургических систем реализованы следующие функции: установлены камера и экран с 3HD разрешением и возможностью увеличения в 15 раз; камеры, эндоскопы и кабель интегрированы в одном портативном устройстве; имеется два вида консоли (одинарная и двойная консоли); новый принцип присоединения инструментов к «рукам» робота (необходимо его просто положить на руку); эндоскоп крепится к любой «руке» (повышенная гибкость для осмотра участка операции); внутренний и внешний диапазон движения составляет 360°.

Da Vinci X может выполнять хирургические процедуры более точно, чем появившийся в 2014 г. da Vinci Xi, а мобильность позволяет размещать его там, где непосредственно проводится операция (однако при этом невозможно выполнять процедуры одновременно в далеко отстоящих друг от друга частях тела). Манипуляторы da Vinci X тоньше и лучше приспособлены к инструментам, чем в предыдущих поколениях, появилась функция включения голосом, лазерные системы наведения инструментов, легкий эндоскоп и оптическая система 3D, позволяющая хирургам наблюдать за перемещениями инструментов внутри пациента. В систему da Vinci X заложена возможность наращивания функционала до предыдущей версии.

Роботизированная хирургическая система da Vinci SP дополняет предыдущие системы, позволяя хирургам получать доступ к узким местам, сохраняя при этом высокое качество обзора, точность и контроль, а также используя новый интерфейс навигатора инструментов (переключать доступ к инструментам между руками или изменять изображение камеры на 180° одним нажатием кнопки). Данное поколение роботизированных хирургических систем получило разрешение FDA (Food and Drug Administration) на применение для

проведения новых видов хирургических операций (радикальной тонзиллэктомии, резекции основания языка и др.), предъявляющих повышенные требования к ширине разреза (минимально возможное инвазивное вмешательство).

Таблица 2

Поколения хирургической системы da Vinci

Год	Вид системы	Система визуализации	Консоль	Эргономика и инструмент
1999–2005	da Vinci Surgical System Population	Экран и камера с HD разрешением	–	–
2005–2015	da Vinci S Systems	Экран и камера с 3HD разрешением, возможность увеличения*	Одинарная консоль	Инструменты EndoWrist управляются кончиками пальцев, имеют от 3 до 4 роботизированных рук, с 7 степенями свободы (больше, чем кисть человеческой руки), изгибаются на 90°
2009–2015	da Vinci Si Systems	Облегченная 3D HD камера с интегрированным управлением фокусировки, освещения и автоматического обнаружения заданных областей	Одинарная и двойная консоли*	Сохранились параметры предыдущей системы, появилась консоль с возможностью эргономической регулировки (позволяет настроить четыре различных параметра для дополнительного комфорта во время хирургических процедур), моторизованное место для пациента, упрощенные настройка и пользовательский интерфейс
2014–2015	da Vinci Xi Systems	Камера 3D HD, возможность увеличения*, улучшенная четкость и натуральная цветопередача, камеры, эндоскопы и кабель интегрированы в одном портативном устройстве	Одинарная и двойная консоли*	Более тонкие манипуляторы и инструменты, увеличенная длина инструментов (возможность оперировать труднодоступные области), новый принцип присоединения инструментов к «рукам» робота (чтобы подключить инструмент необходимо его просто положить на руку); возможность прикреплять эндоскоп к любой «руке», что повышает гибкость для осмотра участка операции
2017–2019	da Vinci X Systems	Камера 3D HD, аналог камеры в системе da Vinci Xi	Одинарная и двойная консоли*	Выросла точность манипуляторов, снижен вес манипуляторов и самой системы (легче в перемещении). При этом система проще и дешевле за счет комплектации, по сравнению с da Vinci Xi Systems
2017–2018	da Vinci SP Systems	Камера 3D HD, с большим разрешением, чем в предыдущих моделях	Одинарная и двойная консоли*. Консоль хирурга как в системах da Vinci X и Xi	Включает в себя три многокомпонентных инструмента со съёмным механизмом. Инструменты позволяют проводить операции с возможностью более глубокого и узкого доступа к тканям, дополняет системы da Vinci X и Xi; гибкое размещение портов; внутренний и внешний диапазон движения = 360°

* Используется для обучения и совместной работы.

Источник: авторская разработка по данным [13].

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КОМПАНИИ INTUITIVE

Анализ отчетов Intuitive свидетельствует о стабильном положении компании на рынке хирургических роботов. Проведенные расчеты показали, что за период 2008–2021 гг. общая прибыль компании выросла в 6,5 раз. Доля прибыли от продажи роботизированных хирургических систем составила в 2021 г. 38% в общей прибыли компании, на долю инструментов и аксессуаров для систем пришлось 50,7%, на сервисное обслуживание (техобслуживание и настройку проданного оборудования) – 17%. При этом 71% выручки компания Intuitive получает в США, остальное – за пределами страны производства (15% продаж компании приходится на Европу, 10% – на страны Азии, 4% – другие рынки сбыта). По состоянию на 2021 г. 54,3% продаж компании приходится на инструменты и аксессуары, 29,7% – на хирургические системы и 16,1% – на услуги; при этом на США приходится 68% от общего объема продаж. Стоит отметить, что финансовое положение Intuitive в 2013 г. было сложным. Снижение прибыли, вероятно, произошло из-за судебных процессов в США, в рамках которых производитель был обвинен в несовершенстве системы, а хирурги-операторы – в преступной халатности. Объективных данных эффективности и безопасности использования системы нет, так как компания-производитель заинтересована в том, чтобы жалобы пациентов замалчивались (в 2013 г. акционеры Intuitive Surgical Inc. подали в суд на совет директоров компании за то, что негативная информация скрывалась и поддерживалась искусственно завышенная цена акций da Vinci). Однако уже в 2014 г. физический объём продаж хирургических систем достиг 164 ед. в квартал, из них 115 ед. – в США. Intuitive является компанией с ликвидными активами, что позволило урегулировать судебные издержки. Число установленных систем выросло в 2014 г. до 2,7 тыс. с 2,6 тыс. ед. годом ранее, в том числе в США – 1,96 тыс. против 1,88 тыс. ед., в Европе – 430 против 416, в остальном мире – 323 против 291; более 58% выручки приходилось на повторных клиентов [13]. Средняя цена продажи за год одной системы выросла до 1,55 млн долл. (ранее – 1,48 млн долл.) за счёт географического распределения продаж и более сложной настройки пункта управления хирурга. Валовая рентабельность (рентабельность выручки по валовой прибыли) выросла на 71%, чистая прибыль выросла на 31% за 2014 г. (до 189 млн долл.). По итогам года рост выручки составил около 16%, а рост операционного дохода – 38% за счёт производства новых инструментов. Выручка от продажи инструментов выросла на 26% в год за счёт роста числа хирургических операций на 18%. В 2021 г. выручка Intuitive составила 5,71 млрд долл. против 4,35 млрд долл. в 2020 г. Доходы компании увеличиваются за счет растущего спроса на роботов-хирургов da Vinci., так в 2021 г. общее число продаж систем составило 1347 ед. (936 ед. в 2020 г.). Основные факторы спроса: медицинская потребность части населения в холецистэктомии (удаление желчного пузыря), хирургии прямой и толстой кишки. На этом фоне падение спроса на простатэктомию (удаление предстательной железы) на 11% не помешало нарастить выручку компании от предоставления услуг и от продажи хирургических систем (в основном за счёт экспорта в Японию). К концу 2021 г. число операций, выполненных с использованием da Vinci, в мире составило более 10 млн (только в 2021 г. их количество составило более 1,6 млн, при этом следует отметить значительный спад в 2019-2020 гг., вызванный пандемией COVID-19). Следует

также отметить, что поддержку Intuitive Surgical оказало в 2020 г. заключение пятилетнего контракта на 420 млн долл. с Министерством обороны США (DoD) на поставку хирургических роботов, инструментов и аксессуаров к ним. В 2021 г. Intuitive получила 5,71 млрд долл., что на 31% больше по сравнению с 4,36 млрд долл. США в 2020 г., при этом расходы компании увеличились с 1,8 млрд долл. до 2,1 млрд долл., поскольку производитель инвестирует значительные суммы в исследования, разработки и продажи своего оборудования. Компания Intuitive активно вкладывает деньги в НИОКР (см. рис. 2), за последние пять лет (2016–2021 гг.) рост инвестиций в научные разработки составлял в среднем 24% в год, что, возможно, обусловлено обостряющейся конкуренцией на рынке роботизированных хирургических систем.

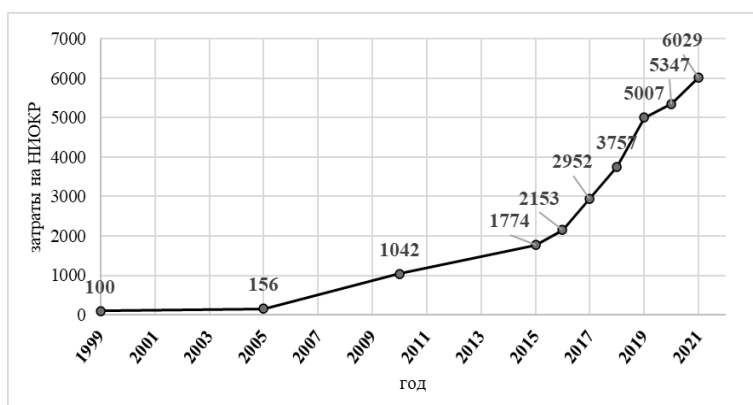


Рис. 2. Изменение затрат на НИОКР компании Intuitive за период 1999–2021 г. (1999 = 100%, в текущих ценах)

Источник: авторская разработка по данным [13].

Доля расходов на НИОКР к выручке компании – наукоёмкость – во время выхода компании Intuitive на рынок составляла в 2001 г. 26,8%, затем этот показатель постепенно снижался и с 2005 по 2021 гг. колеблется в диапазоне 7,6–13,7%, что является средним показателем для высокотехнологичной компании (см. рис. 3).

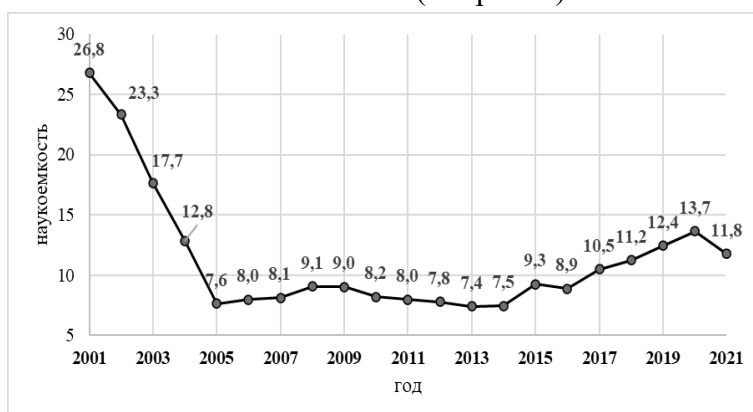


Рис. 3. Наукоёмкость компании Intuitive за период 2003–2021 гг.

Источник: авторская разработка по данным [13].

Рост численности занятых в компании Intuitive за период 2013–2020 гг. составил 90,1% (см. рис. 4), что объясняется значительным ростом как производства

роботизированных систем, так и потребностью в персонале для сервисного обслуживания и необходимостью поддерживать продажи в условиях обостряющейся конкуренции на данном рынке сбыта. В структуре занятых 44,5% составляют работники, занятые маркетингом, продажами и административной деятельностью; 42% занято на производстве и сервисном обслуживании; 13,5% – исследованиями и разработками.

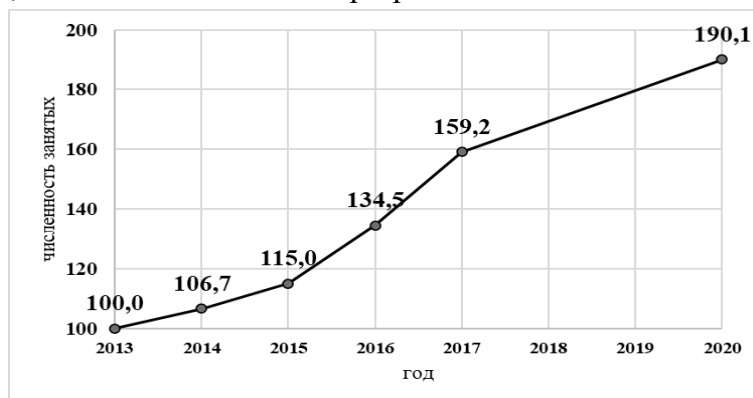


Рис. 4. Динамика численности занятых в компании Intuitive за период 2013–2020 гг., (2013 г. = 100%)

Источник: [13].

Intuitive распространяет свою продукцию посредством торговых представителей и дистрибьюторов в Северной Америке, Южной Африке, Европе, странах Среднего Востока, Австралии и Азии. Крупнейшими импортерами системы являются Япония – 215 ед., Франция – 90 ед., Германия – 77 ед., Великобритания – 55 ед. и Южная Корея – 53 ед. (данные 2015 г.). По данным на июнь 2019 г. [14], в мире было установлено около 5270 хирургических систем da Vinci: 3383 ед. – в США, 911 ед. – в Европе, 689 ед. – в странах Азии. В 2020 г. показатели компании значительно снизились, что было вызвано пандемией COVID-19. Так, в США в 2020 г. было установлено 600 ед. хирургической системы da Vinci (на 18% меньше, чем в 2019 г.), в Европе – 136 ед. (на 20% меньше, чем в 2019 г.), в Азии – 157 ед. (на 14% меньше, чем в 2019 г.), в другие страны было поставлено 43 ед. (на 8% больше, чем в 2019 г.). Однако в 2021 г. количество операций с использованием системы da Vinci выросло на 28% по сравнению с 2020 г., что отражает частичное восстановление после первой волны пандемии. За период 2020–2021 гг. совокупный годовой темп роста процедур составил 14%. В 2021 г. было реализовано 1347 систем da Vinci [15].

Выбор системы da Vinci (Intuitive, США) для проведения анализа обусловлен широким распространением по странам (используется в 67 странах) и значительным временным периодом наблюдения (2001–2019 гг.). В частности, в России за период 2007–2019 гг. было выполнено 15025 операции, работает 33 робота в 27 клиниках страны [16]. На рис. 5 представлена статистика по количеству выполненных операций с использованием da Vinci в РФ за период 2007–2019 гг.

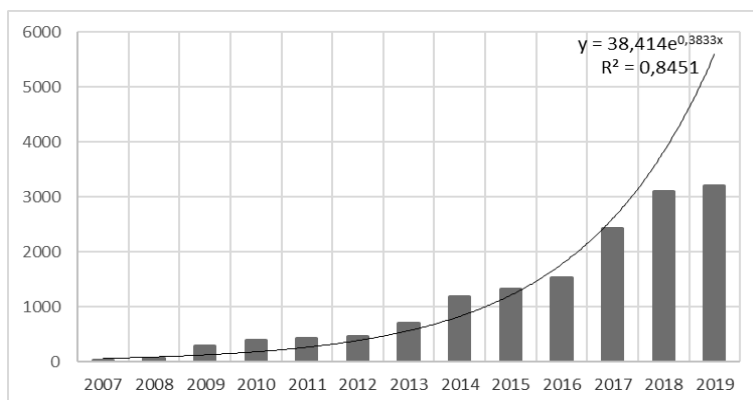


Рис. 5. Количество выполненных операций с использованием хирургической системы da Vinci в РФ в 2007–2019 гг.

Источник: авторская разработка по данным [16].

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ХИРУРГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ DA VINCI ПО СТРАНАМ

В работе также был проведен анализ особенностей распространения хирургической системы da Vinci по странам. Рассматривалась взаимосвязь объемов закупки хирургической системы da Vinci по странам в расчете на 100 тыс. человек населения со следующими показателями: число больничных коек на 1000 человек населения (Hospital beds per 1000 people); число хирургических процедур на 100 тыс. населения (number of surgical procedures per 100 000 population); текущие расходы на здравоохранение в расчете на душу населения (current health expenditure per capita); число медицинских работников на 100 тыс. населения (number of health workers per 100 000 population); индекс GINI (оценка Всемирного банка); ВВП по ППС на душу населения в текущих ценах (долл.). Основным результатом проведенного анализа состоит в том, что с увеличением ВВП на душу населения и текущих расходов на здравоохранение на душу населения, а также при снижении индекса GINI растет число продаж хирургической системы da Vinci (из расчетов были исключены США как страна-производитель данного вида хирургических систем) (рис. 6–8).

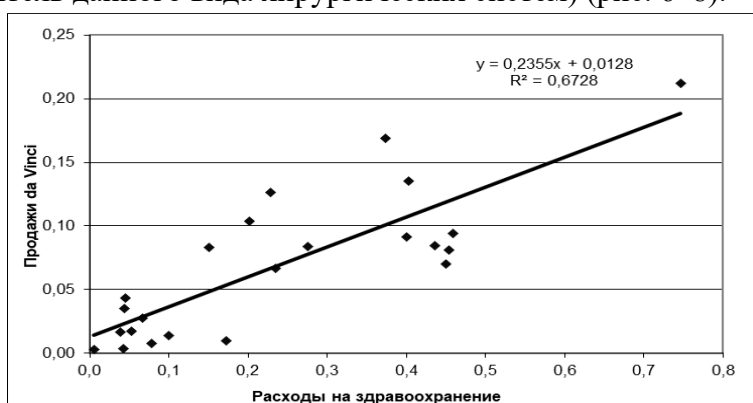


Рис. 6. Зависимость числа продаж хирургической системы da Vinci по странам в расчете на 100 тыс. человек населения (ед.) от текущих расходов на здравоохранение на 10 тыс. человек населения

Источник: авторская разработка по данным [13, 18].

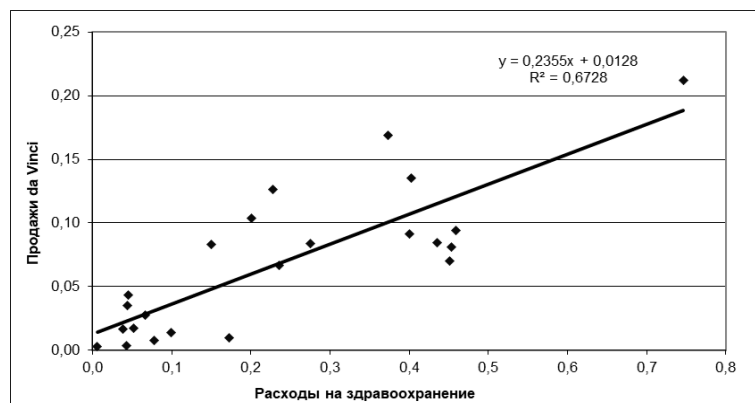


Рис. 7. Зависимость числа продаж хирургической системы da Vinci по странам в расчете на 100 тыс. человек населения (ед.) от ВВП по ППС на 100 тыс. человек населения

Источник: авторская разработка по данным [13, 18].

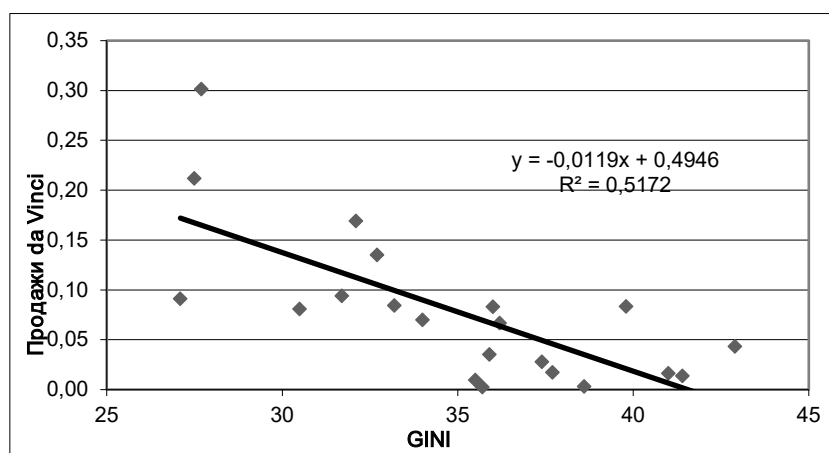


Рис. 8. Зависимость числа продаж хирургической системы da Vinci по странам в расчете на 100 тыс. человек населения (ед.) от индекса GINI

Источник: авторская разработка по данным [13, 18].

В ходе работы была построена многофакторная эконометрическая модель с учетом социально-экономических факторов, влияющих на скорость распространения и масштабы применения медицинских хирургических роботизированных систем. Для этого проведен анализ зависимости продаж робота da Vinci по странам от ряда показателей: ВВП на душу населения (GDP per capita, PPP, current international \$); коэффициент Джини (GINI index); индекс человеческого развития (Human Development Index); расходы на здравоохранение на душу населения (current health expenditure per capita); число хирургических операций в расчете на 100 тыс. человек (Number of surgical procedures per 100,000 population); число хирургов на 100 тыс. человек населения (Specialist surgical workforce per 100,000 population); число медицинских работников на 100 тыс. человек населения (number of health workers per 100,000 population) и др. В выборку вошли 26 стран, по которым есть данные по статистике продаж da Vinci. Модель, описывающая распространение хирургической системы da Vinci по странам от основных социально-экономических показателей, имеет вид: $Y_p = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2$, где Y_p – число продаж по странам робота-хирурга da Vinci в расчете на

10 млн человек населения (ед.), x_1 – число хирургов на 100 тыс. человек населения, x_2 – расходы на здравоохранение на душу населения (долл.). Для всей выборки (26 стран, включая США), были получены следующие оценки параметров модели: $a_0 = 1,01$ (0,27), $a_1 = -0,09$ (-1,78), $a_2 = 0,01$ (7,2), $R^2 = 0,71$.

Основной результат проведенного моделирования состоит в том, что продажи по странам робота-хирурга растут с ростом затрат на здравоохранение и снижением численности хирургов в стране.

БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕДИЦИНСКИХ РОБОТОВ

По мере все более активного внедрения роботов в сферу медицины возникают проблемы этического плана, в том числе проблемы вытеснения роботами человека и угрозы, которые может представлять для человека искусственный интеллект.

Как уже отмечалось ранее, к преимуществам медицинских роботов можно отнести снижение риска инфицирования, меньшее число осложнений; быструю реабилитацию пациентов (из-за меньших разрезов и более высокой точности роботизированной хирургии); снижение риска осложнений по сравнению с традиционной медициной; минимальную болезненность при лечении; снижение кровопотери при операциях, снижение необходимости переливания крови, уменьшение послеоперационных шрамов; манипуляторы имеют больше степеней свободы по сравнению с лапароскопическими инструментами; они обеспечивают возможность совмещения данных компьютерной томографии и МРТ; обеспечивают отсутствие дрожания, так как конечность робота более устойчива, чем человеческая рука, и не устает; позволяет осуществлять дистанционное хирургическое вмешательство.

Однако можно отметить и недостатки применения роботов в медицине: отсутствие обратной связи, так как манипуляторы способны развивать значительные усилия, и врачу следует оценивать свои движения, чтобы не повредить ткани; узкое операционное поле; запаздывание между действиями хирурга и движениями робота; продолжительность настройки оборудования, его высокая стоимость; длительность и высокая стоимость подготовки медицинского персонала; сложность обучения, связанная с необходимостью работы в обратном (зеркальном) направлении; роботизированные технологии дороги как с точки зрения капитальных затрат, так и текущих расходов; роботизированные системы в хирургии предполагают использование одноразовых инструментов, что значительно удорожает стоимость лечения; существует возможность взлома и повреждения компьютерных систем, что может нанести непоправимый вред пациенту.

В настоящее время практически нет данных по безопасности применения роботов в медицине, и реальная картина эффективности и безопасности использования роботизированных систем не ясна. Например, в США проходит несколько судебных процессов, так как Intuitive Surgical (производитель Da Vinci) был обвинен в несовершенстве системы, а хирурги – в преступной халатности, в замалчивании жалоб пациентов (число официальных обращений с жалобами составляет более 4,5 тыс. без учета случаев несущественных послеоперационных осложнений). По данным американского государственного агентства Food and Drug Administration (FDA), с начала эксплуатации робота Da Vinci в 2000 г. на его счету

85 смертных случаев и 245 серьезных осложнений (по данным на 2014 г.). В 2011–2013 гг. против Intuitive Surgical было заведено 10 судебных дел.

В 2013 г. FDA провела на добровольных началах опрос хирургов, оперирующих с помощью робота Da Vinci, с целью выявления частых осложнений, которые происходили в их работе. Наибольшую опасность представляют ожоги и повреждения, связанные с высокой температурой. Также сообщается об опасности проведения гинекологических операций с помощью Da Vinci, так как манипулятор может задеть жизненно важные органы, а инструмент может произвести ожог, что проявится только позже.

С проблемами при использовании Da Vinci столкнулись и в Дании. Так, в 2012 г. были на несколько недель приостановлены операции с использованием этих систем в пяти госпиталях, так как в университетской больнице Одензе были обнаружены микроскопические царапины на хирургических инструментах аппарата. Компания-производитель заменила бракованную партию, а датские врачи разработали специальную систему стерилизации автоматических инструментов.

В 2019 г. против компании Intuitive Surgical были поданы антимонопольные иски от сторонних ремонтных и сервисных компаний, а также в 2021 г. непосредственно от больниц – на монопольное положение производителя медоборудования, которое вынуждает клиники покупать услуги по техническому обслуживанию и запасные части по завышенным ценам, несмотря на существование на рынке более дешевых вариантов.

По мнению ряда экспертов в области робототехники, уже в ближайшем будущем врачи будут вытесняться роботами и экспертными информационными системами. Так, крупнейший венчурный инвестор В. Хосла на конференции по инновационным технологиям в здравоохранении заявил, что «80% врачей скоро вполне могут быть заменены программным обеспечением». По его мнению, информационные медицинские роботизированные системы смогут поставить более точный диагноз и предложить пациенту индивидуальный курс лечения на основе анализа и сопоставления растущего массива медицинских данных, причем сделают это эффективнее врача. Роботизированные медицинские системы, принимая участие в диагностике, ошибаются, согласно данным исследования ученых из университета Индианы, на 42% меньше обычных врачей, они помогают принимать решения врачам-радиологам и анестезиологам. Роботы–медицинские сестры умеют расспросить больного о его проблемах, они ухаживают за пожилыми людьми, помогают пациентам восстанавливаться психологически, как, например, электронный детеныш тюленя PARO, которого использовали для психологической реабилитации пострадавших во время аварии на Фукусимской АЭС. Как отмечает Л. Фелдман из John Hopkins School of Medicine, медицинская практика в настоящее время значительно изменилась, так как врач проводит гораздо меньше времени, чем раньше, общаясь с пациентом в госпитале (8 минут в день, около 20% времени, отведенного на одного больного).

Современная медицина использует технологии Big Data (Больших Данных), и это может угрожать сокращением рабочих мест, в первую очередь, терапевтам и диагностам. Активное внедрение роботов-хирургов также может способствовать замещению ими ряда специалистов. В США сокращение количества хирургов, делающих открытые серьезные операции, и замена их операторами роботов, вероятно, произойдет в ближайшем будущем,

так как система da Vinci обходится дорого, но окупается в течение шести лет при условии проведения от 150 до 300 операций в год [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ мирового рынка медицинских роботов показывает его значительный рост на протяжении многих лет. При этом одним из наиболее быстро растущих направлений являются роботы для проведения хирургических операций, что обусловлено спросом на минимально инвазивные операции за счет использования роботов. Однако при этом следует учитывать как этические проблемы, так и проблемы безопасности при применении медицинских роботов.

Данные отчетов компании Intuitive позволили выделить семь поколений хирургической системы da Vinci, которые отличаются по системе визуализации, виду консоли, эргономике и инструментам.

Проведенный анализ особенностей распространения хирургической системы da Vinci показал, что число продаж хирургической системы по странам растет с уменьшением ВВП на душу населения и текущих расходов на здравоохранение на душу населения, а также при снижении индекса GINI.

Проведенный анализ зависимости распространения хирургической системы da Vinci по странам от основных социально-экономических показателей, влияющих на скорость распространения и масштабы применения медицинских хирургических роботизированных систем, показал, что число продаж робота-хирурга растет с ростом затрат на здравоохранение и снижением численности хирургов в стране.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варшавский А.Е., Дымова И.А. Проблемы развития рынка роботизированных технологий // Математика. Компьютер. Образование: Сб. научн. трудов. Выпуск 17, Том 2 / Под. ред. Г.Ю. Ризниченко. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. С. 43–49.
2. Комкина Т.А. Особенности развития рынка роботизированных хирургических систем // Научно-практический журнал «Концепции». 2017. № 1 (36). С. 29–36.
3. Комкина Т.А. Особенности и перспективы развития медицинской робототехники // Научно-практический журнал «Концепции». 2015. № 1 (33). С. 25–33.
4. World Robotics 2015–2016. URL: <http://www.ifr.org> (дата обращения: 06.09.2022).
5. World Robotics 2020–2021 – Service Robots report released. URL: <https://ifr.org> (дата обращения: 06.09.2022).
6. Executive Summary World Robotics 2017 Service Robots. URL: https://ifr.org/downloads/press/Executive_Summary_WR_Service_Robots_2017_1.pdf (дата обращения: 06.09.2022).
7. Роботы-хирурги (мировой рынок). URL: http://zdrav.expert/index.php/Статья:Роботы-хирурги_%28мировой_рынок%29. (дата обращения: 17.05.2022).
8. Spinal Surgical Robots: Market Shares, Strategies, and Forecasts, Worldwide, 2016–2022, ID: 3616179, February 2016.
9. Surgical Robots Market, Verified Market Research, Oct. 25, 2021. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/surgical-robots-market-size-worth--22-27-billion-globally-by-2028-at-17-60-cagr-verified-market-research-301407455.html> (дата обращения: 06.09.2022).
10. Дубинина М.Г. Инновационные робототехнические фирмы перспективные направления развития робототехники // Математика. Компьютер. Образование: Сб. научн. трудов (выпуск 21). № 2. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2014. С. 75–81.

11. Сайт о хирургической системе da Vinci. URL: <http://www.robot-davinci.com> (дата обращения: 17.05.2022).
12. Davis J. W. Usha S. Kreaden, Jessica Gabbert, Raju Thomas Learning Curve Assessment of Robot-Assisted Radical Prostatectomy Compared with Open-Surgery Controls from the Premier Perspective Database // Journal of Endourology. 2014. Т. 28. №. 5.
13. Intuitive Surgical Company. URL: <http://www.intuitive.com> (дата обращения: 17.05.2022).
14. Investor Presentation Q3 2019. URL: <https://isrg.intuitive.com/static-files/880bf027-e866-4c32-b910-5332467cd8dc> (дата обращения: 17.05.2022).
15. Intuitive Surgical Company. Annual Report 2020. URL: <https://isrg.intuitive.com/static-files/80b10bf5-c1da-4ad3-bb0e-8c595e2c712c> (дата обращения: 17.05.2022).
16. Роботическая хирургия в России. URL: <https://robot-davinci.ru> (дата обращения: 17.05.2022).
17. TED. Ideas worth spreading. URL: <https://www.ted.com/topics/robots> (дата обращения: 17.05.2022)
18. Организация экономического сотрудничества и развитие OECD. URL: <https://data.oecd.org> (дата обращения: 10.06.2022)

ГЛАВА 15.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОНИКИ В МЕДИЦИНСКОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ

ВВЕДЕНИЕ

Медицинская робототехника развивается быстрыми темпами [1, 2]. Применение бионики в протезировании является одним из перспективных и быстроразвивающихся направлений медицинской инженерии, она широко применяется для замены сниженных или утраченных функций (Robotic Replacement of Diminished/Lost Function). Потеря конечности, частичная неподвижность представляют собой значительную социальную проблему. Так, по некоторым данным, в мире 50 млн человек ежегодно становятся инвалидами, а функциональные нарушения, мешающие нормальной жизнедеятельности, имеют около 15% населения, финансовые потери при этом составляют свыше 4 трлн долл. Использование ортопедического протезирования позволяет существенно повысить функциональность и комфорт людей с ограниченными возможностями путем замены потерянных или ампутированных конечностей. В отличие от традиционных протезов робототехнические устройства могут автоматически изменить уровень или вид помощи. Роботизированные протезы, как правило, позволяют свободно двигаться, обеспечивая необходимую поддержку, при этом происходит слияние механического устройства с человеческими мышцами, скелетом и нервной системой путем бесшовной нейрональной интеграции, которая обеспечивает интуитивное управление конечностями, а также с помощью сенсорной обратной связи с пользователем.

Начало использования бионики в протезировании связано с применением ее для верхних конечностей, официально первый протез такого типа был представлен в 2010 г., однако уже в 2007 г. компания Touch Bionics начала выпуск протеза i-Limb Hand. Технология снятия с сохранившихся мышц импульсов является и сегодня основной, однако стали применяться более чувствительные датчики, расширился диапазон движений (как пальцев, так и самой кисти), протезы нового поколения имеют естественный внешний вид и восполняют важнейшие утраченные функции. Сейчас ведется разработка бионического протеза, передающего в мозг тактильные сигналы. Помимо разработки бионических робопротезов верхних конечностей и отдельных пальцев, разработаны и начато производство роботизированных костюмов для реабилитации частично парализованных людей – экзоскелетов (например, HAL японкой компании Cyberdyne помогает людям с ограниченными возможностями ходить), системы протезирования тазобедренного и коленного суставов (например, ROBODOC и ACROBOT, которые позволяют эффективно планировать оперативное вмешательство, тщательно подготавливать кость для установки протеза в оптимальной позиции, сокращая этим время операции и уменьшая ее травматичность). Глава подготовлена на основе статьи*.

* Комкина Т.А., Никонова М.А., Дубинина М.Г. Техничко-экономический анализ отдельных видов сервисных роботов // Экономический анализ: теория и практика. 2020. Т. 19. Вып. 10. Октябрь С. 1965–1986. DOI: <https://doi.org/10.24891/ea.19.10.1965>

ЭКЗОСКЕЛЕТЫ

Существуют несколько видов классификации медицинских экзоскелетов и протезов: по частям тела человека (для нижних конечностей, для верхних конечностей, комплексные, для кисти руки); по назначению (для восстановления функций тела человека после операций и болезней, для постоянного использования людьми с ограниченной мобильностью); по конструкции (по источнику питания – пассивные, силовые); по типу датчиков (контактные, бесконтактные); по типу силового привода (электрические, гидравлические).

В настоящее время мировой рынок экзоскелетов и роботизированных протезов еще не сформирован, однако большинство экспертов сходятся во мнении, что он обладает большим потенциалом. По данным исследования «Global Wearable Robots, Exoskeletons 2015–2021», ожидается значительный рост рынка роботизированных экзоскелетов для реабилитации с 16,5 млн в 2014 г. до 2,1 млрд долл. в 2021 г. [3].

Экзоскелеты повторяют биомеханику человека, способствуют повышению физической силы пациента и помогают при восстановительном процессе опорно-двигательного аппарата. Они используются для реабилитации пациентов после временной утраты подвижности (инсульта, операции, травмы и др.), также предназначены для постоянного использования людьми с ограниченной подвижностью, включая пожилых. Следует отметить, что первоначально основное направление разработок экзоскелета было ориентировано на военное применение.

Зарубежные экзоскелеты

Основными разработчиками и производителями экзоскелетов за рубежом являются следующие компании.

Ekso Bionics Holdings Inc. (EKSO), США – занимается разработкой экзоскелетов с 2005 г. и считается лидером в сегменте роботизированных экзоскелетов и нательных роботов; выпустила на рынок первый коммерчески доступный продукт Ekso GT.

Cyberdyne, Япония – с 2004 г. занимается разработкой роботизированного медицинского силового экзоскелета серии HAL (HAL3 – для нижней части тела, HAL5 – для всего корпуса).

ReWalk Robotics, Израиль – основана в 2001г., специализируется на производстве экзоскелетов для реабилитационного лечения и повседневного использования людьми с ограниченной мобильностью серии ReWalk.

Harmony, США – медицинский экзоскелет для реабилитации мышц верхней части туловища.

Indego Parker Hannifin, США – медицинский экзоскелет для клинического и повседневного использования.

RexBionics, Новая Зеландия – REX моторизированный экзоскелетный костюм, обеспечивающий прямохождение людям, страдающим параличом нижних конечностей, также используется для реабилитации после операции.

SuitX, США – медицинский экзоскелет Phoenix для самостоятельного передвижения маломобильными (парализованными) людьми.

Honda Motors, Япония – экзоскелет Stride Walking Assist Design (WAD), облегчающий передвижение пожилым людям.

University of Hertfordshire, Европа – экзоскелет-перчатка Unnamed для восстановления правильной двигательной активности кисти руки, например, после инсульта.

Ниже рассмотрены некоторые примеры успешных разработок экзоскелетов.

Роботизированный бионический костюм Ekso GT (компания Ekso Bionics Holdings Inc., США). Ekso GT – роботизированный бионический костюм, используется в программе реабилитации людей с ослабленными нижними конечностями позволяет пациентам передвигаться; сделан из алюминия и титана, вес 23 кг, снабжён гироскопом, датчиками траектории и крутящего момента, обрабатывает получаемую информацию 500 раз в секунду, чтобы обеспечить пользователю удобство при каждом шаге, зарядка костюма занимает около 1 часа и позволяет ходить до 3 часов.

Производятся 4 модели Ekso GT: FirstStep (тренажер или «корректировщик» нажимает специальные кнопки, иницируя движение); ActiveStep (пользователь сам нажимает кнопки на роботе или на костылях); ProStep (пользователь сам двигает бёдрами); ProStepPlus (пользователь сам переносит вес на ноги и делает шаги). Эксплуатация Ekso GT возможна при условии, что у пациента достаточно сильные руки для поддержки массы тела на костылях или опорных ходунках, рост 150–190 см, вес не более 100 кг [4]. Движение достигается за счет смещения веса пользователя, что активирует датчики в устройстве, которые отвечают за шаги; нервно-мышечную функцию заменяют двигатели для передвижения ног. Используется для обучения ходьбе под медицинским контролем для лиц с различной степенью паралича или гемипареза, вследствие неврологических заболеваний (инсульт, травмы спинного мозга и черепно-мозговые травмы), он облегчает ходьбу для людей с широким диапазоном двигательных функций, при полном параличе нижних конечностей снижается риск вторичных осложнений (депрессия, невропатические боли кишечника и мочевого пузыря).

По данным компании Ekso Bionics, в середине 2016 г. около 115 реабилитационных учреждений в мире использовало Ekso GT, в США более 2000 человек с различной степенью паралича нижней части тела используют постоянно этот экзоскелет. Стоимость Ekso GT составляет более 100 тыс. долл. за костюм, однако пациенты могут воспользоваться им в клиниках за счёт благотворительных организаций или медицинской страховки. Компания имеет разрешение FDA (Food and Drug Administration, Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов) на продажу аппаратов только для реабилитационных клиник, тогда как экзоскелеты от ReWalk Robotics и Indego Parker Hannifin одобрены FDA для использования как в клиниках, так и дома.

Роботизированный бионический костюм HAL (компания Cyberdyne, Япония). HAL 3 закрепляется на поясе и обеспечивает движение ног (вес прибора 10 кг). HAL 5 увеличивает силу человека за счет внешнего каркаса, восстанавливает работу рук, ног и торса, может также использоваться для ухода за пожилыми людьми или больными в госпиталях (вес 12 кг). Полная комплектация весит 23 кг, время непрерывного действия – 2 ч. 40 мин., используется система комбинированного контроля. Сервоприводы приводятся в действие электрическими импульсами, вырабатываемыми мускулами и улавливаемыми датчиком, прикрепленным к пользователю. На основании полученных сигналов аппарат перемещается; «добровольная система управления» интерпретирует намерения человека двигаться, используя биосигналы и доводя их до фактического движения [5].

В 2012 г. начались больничные испытания костюма HAL в Японии, в настоящее время планируется ежегодно выпускать около 400 экземпляров для реализации. В 2006 г. цена на прототип роботизированного костюма HAL составляла 50 тыс. долл., в 2011 г. – от 14 тыс. до 19 тыс. долл., в 2016 г. костюм стоил 4,2 тыс. долл.

Медицинский экзоскелет ReWalk (компания ReWalk Robotics, Израиль). Система представляет собой костюм, который с помощью специальных датчиков распознает движения верхней половины тела человека и подает сигнал ножным конструкциям. Благодаря этому человек может совершать естественные для ходьбы движения, включая вставание, усаживание, повороты верхней части туловища. Пульт управления встроен в наручные часы, на которых пользователь может задать различные режимы работы. Вес экзоскелета ReWalk составляет 23,3 кг (батарея – 2,3 кг, роботизированная нога с рюкзаком – 21 кг); аккумуляторов хватает на 4 часа бесперебойной работы [6]. Система ReWalk доступна в двух версиях: ReWalk (используется в медицинских учреждениях для исследования или терапии под наблюдением врача) и ReWalk P (для индивидуального применения пациентами на дому или в общественных местах). В 2015 г. была выпущена шестая версия ReWalk P 6.0, отличительной особенностью которой является то, что экзоскелет изготавливается по меркам заказчика, что положительно сказывается на удобстве ношения, позволяет развивать максимальную скорость ходьбы до 2,6 км/ч; рюкзак с батареей был смещен ниже, за счет чего снизилась нагрузка на плечи; была улучшена система креплений (экзоскелет стало легче надевать и снимать). Цена экзоскелета ReWalk составляла в 2015 г. 71,6 тыс. долл., а ReWalk P6.0 – 77,5 тыс. долл. Следует отметить, что устройство не очень подходит для пожилых людей и требует достаточно сильных мышц верхней части тела.

Экзоскелеты в России

Основными разработчиками и производителями экзоскелетов в России являются следующие компании.

«Экзороботикс», г. Москва – в компании собран коллектив сотрудников, занимающихся НИОКР в НИИ механики МГУ, где разрабатывался «ПАК Экзоскелетон» в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 гг.», а также экзоскелет ЭкзоАтлет.

Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ), г. Курск – в лаборатории механотроники и робототехники ЮЗГУ разработан прототип пассивного экзоскелета для нижних конечностей Echo.

Ниже рассмотрены примеры российских разработок экзоскелетов.

Медицинский экзоскелет ЭкзоАтлет (компания «Экзороботикс», г. Москва). Разработка экзоскелета ЭкзоАтлет была начата в 2011 г. МЧС России и учеными МГУ. Первый в России действующий прототип экзоскелета был впервые продемонстрирован на «IV Международном салоне Комплексной Безопасности 2013». ЭкзоАтлет может использоваться как для медицинской, так и для социальной реабилитации людей с нарушениями опорно-двигательных функций; предназначен для вертикализации и ходьбы пациента с локомоторными нарушениями нижних конечностей (пациенты получают возможность ходить, подниматься и спускаться по лестницам, садиться и вставать без посторонней помощи), система управления построена на сигналах силомоментных датчиков и электромиограммы.

Алгоритмы управления позволяют осуществлять в автоматическом режиме передвижение пациента с повторением максимально естественного паттерна ходьбы человека, что позволяет существенно ускорить процесс восстановления двигательной и нервной активности, вертикализация организма и ходьба обеспечивают правильное функционирование внутренних систем и органов человека.

Преимущества ЭкзоАтлета перед зарубежными аналогами: доступность – стоимость ЭкзоАтлета 1,5 млн руб. (зарубежные аналоги стоят 10–12 млн руб.), небольшой вес – 8–12 кг (возможно его снижение при появлении новых материалов), вес аккумуляторов – 0,6 кг [7]. В 2014 г. была разработана вторая версия прототипа – ЭкзоАтлет Альберт. С июня 2016 г. ЭкзоАтлет является зарегистрированным в Росздраве медицинским изделием.

Медицинские экзоскелеты EхоMeasure, EхоLite, EхоHeavy (Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ)), г. Курск. EхоMeasure – экзоскелет для нижних конечностей, устройство в точности повторяет биомеханику движения человека в тазобедренном суставе, существенно снижает нагрузку на мышцы и суставы, может применяться как для проведения медицинской, так и социальной реабилитации пациентов, страдающих от нарушений опорно-двигательных функций, для нужд терапии и реабилитации профильного контингента реабилитационных центров и больниц.

К настоящему времени созданы три версии этого устройства: EхоMeasure – пассивный экзоскелет, оснащенный системой датчиков, определяющих функциональные возможности человека (угол наклона, скорость передвижения); EхоLite – благодаря приводам в бедрах и голени позволяет пациенту вставать, садиться, ходить по лестнице; EхоHeavy (перспективная разработка) – поможет пациенту вертикализироваться, а также поднять дополнительный груз до 80 кг (вне зависимости от того, может ли двигаться человек). Испытания EхоMeasure и EхоLite начались в 2016 г. После тестирования предварительной партии прототипов начато серийное производство. Экзоскелеты будут выпускаться в двух вариантах: для реабилитационных центров, где инвалиды и пожилые люди смогут восстанавливать нарушенные двигательные функции, его предварительная цена – до 700 тыс. руб. (с выходом на массовое производство стоимость может заметно снизиться); для армии, силовых структур и промышленных предприятий (тяжелая версия экзоскелета).

БИОНИЧЕСКИЕ ПРОТЕЗЫ

Развитию бионических протезов способствовали достижения в области электрофизиологии, микроэлектроники, биомеханики и систем управления с обратными связями [8]. Также следует отметить значительный спрос на протезирование во всем мире, т.к. ампутации могут приводить к психологическому стрессу, экономическим потерям, трудностям в адаптации в обществе [9]. В США около 2 млн человек с ампутациями конечностей (185 тыс. ампутаций в год), в ЕС – около 3,18 млн человек (295 тыс. ампутаций в год) [10], официальных данных по количеству людей с ампутациями в России нет (статистика по данному коду заболевания не ведется).

В настоящее время существует несколько подходов к классификации бионических протезов. Их можно классифицировать в соответствии с анатомической структурой: протезы верхней конечности (плечо, кисть, предплечье с кистью); протезы нижних

конечностей (бедро, стопа, голень со стопой). Также бионические протезы можно классифицировать в зависимости от функциональных возможностей и анатомического сходства: протезы с активным движением, но небольшим анатомическим сходством (позволяют выполнять сложную работу и манипуляции, такие как ходьба, удерживание предметов, обычно закрываются одеждой); протезы с двигательной и тактильной функцией, покрыты материалом, напоминающим естественную кожу и имеют возможность ощущать давление и температуру (наиболее дорогостоящий тип протезов, но полностью отвечающий восстановлению функции и устранения косметического дефекта).

Для наибольшей производительности бионические протезы рук с функциональной позиции должны соответствовать следующим требованиям [11]:

- основа протеза должна быть изготовлена из легкого, но прочного материала, обычно в производстве используются титановые сплавы (особенно важно для протезов нижних конечностей, которые испытывают значительные нагрузки);
- в настоящее время в бионических протезах используются специальные процессоры, отвечающие за передачу сигналов с мышц культи;
- длительное автономное электронное питание для работы процессора и микро-движков;
- износостойкость деталей (шарниры, имитирующие сустав, должны быть устойчивыми и обеспечивать плавное движение в них);
- максимальная приближенность в анатомическом сходстве.

Зарубежные бионические протезы

Основными разработчиками и производителями роботизированных протезов за рубежом являются следующие компании.

Touch Bionics, Великобритания – основана в 2003 г., первая в мире установила в 2007 г. бионическую руку – миоэлектрический протез i-Limb. Выручка Touch Bionics в 2015 г. составила 15 млн долл., при этом наибольшие продажи продукции зафиксированы в Германии и Франции. В 2016 г. исландская компания Ossur, выпускающая бионические протезы нижних конечностей, купила Touch Bionics за 27,5 млн фунтов, что по мнению некоторых экспертов, связано с изначально неверно выбранной бизнес-моделью – компания делала дорогие сверхсложные устройства.

RSLSteepe, Великобритания – компания находится на рынке более ста лет, первая версия бионической кисти была показана в 2010 г., в настоящее время выпускается уже третье поколение бионической кисти beBionic.

Otto Bock, Германия – основана в 1919 г., специализируется на протезировании верхних и нижних конечностей; с 2011 г. начат выпуск бионических рук MyoFacil и Michelangelo.

Ниже рассмотрены примеры наиболее успешных разработок роботизированных протезов.

Бионический протез i-Limb (компания Touch Bionics, Великобритания). Первый миоэлектрический протез i-Limb позволял с помощью датчиков, установленных всего у двух мышц, работать с различными хватами, в 2014 г. появилась усовершенствованная версия i-Limb Revolution, которую отличают следующие особенности: большой палец может

устанавливаться в требуемое положение автоматически или вручную, 24 вида моделей хвата, автоматическая ротация большого пальца кисти обеспечивает точный хват, предохранительная муфта предотвращает перегрузку большого пальца кисти, два размера кисти (средняя и малая); изменяющиеся виды хвата позволяют получить надежный хват пальцами кисти; соединитель запястья (быстросъемное запястье, гибкое мультифлекс запястье, гибкое запястье и крепление под запястьем). Технические характеристики i-Limb Revolution: напряжение источника питания 7,4 В (номинальное), максимальный ток 5 А, емкость источника питания 1300/2400 мАч (перезаряжаемый литий-полимерный аккумулятор), максимальная предельная нагрузка на кисть 90 кг (статическое ограничение), нагрузка на палец 32 кг (статическое ограничение), время перехода из открытого положения в положение полного хвата 1,2 секунды, вес устройства с быстросъемным запястьем 507 г (малая кисть) и 515 г (средняя кисть). В 2016 г. компания представила следующее поколение бионической руки – i-Limb Quantum (см. табл. 1), более функциональное устройство, в котором предусмотрено 24 хвата и есть возможность настроить ещё 12 хватов под владельца; устройство может управляться жестами за счет запатентованной инновационной технологии (i-mo), является первой кистью в протезировании верхних конечностей, которая может менять вид хвата при помощи простого жеста, скорость перемещения пальцев увеличилась на 30%, мощность – на 30%, время работы от аккумулятора – на 50%. У биопротеза Ultra (обновлен в 2018 г.) появилась возможность индивидуальной настройки характеристик захвата (изменение скорости и силы), а также сократилось время от открытия до полного силового схвата на 0,4 сек., увеличилось число предопределенных видов схвата при увеличении среднего веса протеза [12].

Бионический протез beBionic (компания RSLSteeper, Великобритания). В 2010 г. первый бионический протез beBionic был представлен в Германии. Он обладал четырьмя функциональными схватами, которые можно было переключить с помощью большого пальца, что достаточно удобно (см. табл. 2). В 2011 г. появилась кисть второго поколения beBionic2, улучшилась скорость, аккуратность, захват и прочность (обновлённая версия кисти доступна в двух размерах: средняя и крупная), позволяет поднимать вес до 45 кг, устройство было снабжено новым внутренним аккумулятором для более продолжительного использования (2200 мАч); с помощью сенсоров протез подстраивается под габариты и формы объекта. В 2012 г. была выпущена следующая версия бионического протеза руки beBionic3, который управляется посредством остаточных электрических сигналов от мышц, встроенные микропроцессоры и датчики преобразуют эти сигналы в команды для электродвигателей протеза, может принимать 14 различных положений, однако переключаться между ними нужно вручную – с помощью второй руки, доступен в нескольких комплектациях и с разным программным управлением. Последняя модель beBionic Small была выпущена в 2015 г. – компактный протез, на 30% меньше по размеру, чем предыдущая модель beBionic3, весит 390 г. (подходит для женщин и подростков), шарнирный механизм управляется электромоторами, а на кончиках пальцев есть специальные воздушные подушечки, чтобы аккуратно брать мелкие предметы, носить предметы весом до 45 кг; оснащен 14 сенсорами захвата для получения максимально естественных движений. В дальнейшем был улучшен внешний вид руки, внедрена инновационная конструкция ладони (защита кисти от ударов и повреждений), увеличена мощность микропроцессора.

Таблица 1

Технические характеристики бионических протезов рук i-Limb, 2007–2016 гг.

Вид	Год	Число типоразмеров	Максимальный предел нагрузки на кисть, кг (статический)	Предел несущей нагрузки на пальцы (статический)	Время от открытия полного силового схвата, сек.	Число предопределенных видов схвата	Вес, гр	
							min	max
i-Limb Hand	2007	2	20	10	2	4	507	518
i-Limb Pulse	2010	2	90	18	1,6	8	500	530
i-limb™ quantum (XS)	2016	4	40	20	0,8	24	432	572
i-limb™ quantum (S, M, L)	2016	4	90	32	0,8	24	472	628
i-limb™ revolution (XS)	2016	4	40	20	1,2	24	432	572
i-limb™ revolution (S, M, L)	2016	4	90	32	1,2	24	472	628
i-limb™ ultra (XS)	2016	4	40	20	1,2	14	392	532
i-limb™ ultra (S, M, L)	2016	4	90	32	1,2	14	428	578
i-limb™ access (XS)	2016	4	39,9	20	1,2	12	392	532
i-limb™ access (S, M, L)	2016	4	90	32	1,2	12	428	578

Источник: [12].

Таблица 2

Технические характеристики бионических протезов рук beBionic, 2010–2015 гг.

Вид	Год	Число типоразмеров	Максимальный предел нагрузки на кисть, кг (статический)	Предел несущей нагрузки на пальцы (статический)	Число предопределенных видов схвата	Сила схвата (встречный захват)	Сила схвата (боковой захват)	Сила схвата (нейтральный захват)	Вес, г	
									min	max
beBionic1	2010	1	∞	∞	4	∞	∞	∞	∞	∞
beBionic2	2011	2	∞	∞	6	75	∞	34	495	539
beBionic3	2012	3	45	25	14	140,1	36,6	26,5	550	598
Bebionic Small	2015	1	45	25	14	140,1	36,6	26,5	390	460

Источник: [14].

Бионический протез Michelangelo выпускается компанией Otto Bock (Германия). Протез с кистью Michelangelo обладает расширенной функциональностью благодаря интеграции с цифровой системой Axon-Bus, движения максимально естественны, имеется семь возможных вариантов захвата с максимальной силой в 7 кг и возможностью ее контролировать. Michelangelo имеет естественный внешний вид (благодаря материалам, имитирующим кости, суставы, мышцы и сухожилия), овальный лучезапястный сустав максимально приближен к биологическому образцу.

Бионические протезы в России

Наиболее успешным разработчиком и производителем роботизированных протезов в России являются компания «Моторика», г. Москва – была создана в 2015 г. двумя компаниями – W.E.A.S. Robotics Group и Can-touch.ru; занимается разработкой электромеханических протезов верхних конечностей с системой мио-управления (снятие электрических импульсов с мышц), а также комплексной системы обучения пользованием протезом с применением технологий виртуальной реальности (VR); применение технологии 3D-печати на стадии разработки протезов позволяет снизить стоимость и ускоряет НИОКР; в настоящее время занимается разработкой и внедрением двух проектов протезов – функционального и бионического, рассчитывает занять 5–10% российского рынка, продавая 400–800 протезов в год.

Протезы Киби и Stradivary (компания «Моторика», г. Москва). Киби – функциональный, активный тяговый протез кисти, предназначенный для людей со сложными частичными травмами кисти. Он может быть легко модифицирован под любой характер травмы, даже если потеряны несколько пальцев, главное требование – сохранение подвижности лучезапястного сустава (в России подобные случаи протезируются редко, в большинстве случаев предлагается только косметическое решение).

Stradivary – бионический протез руки, является первым отечественным высокофункциональным миоэлектрическим протезом предплечья, а в ближайшем будущем, полной руки. Миоэлектрический (биоэлектрический, бионический) протез приводится в действие с помощью электродов, считывающих электрический ток, вырабатываемый мышцами культи в момент их сокращения, затем информация передается на микропроцессор кисти, в результате чего протез выполняет определенный жест или хват (позволяет пользоваться ложкой, вилок, шариковой ручкой и т.п.). В настоящее время создано несколько тестовых прототипов, прошло испытание на первом пользователе, идет разработка серийного прототипа. Протез рассчитан на взрослого пользователя и будет обладать следующими характеристиками: соответствие антропометрическим данным пользователя, до 6 различных хватов и жестов в базовой версии, время активной эксплуатации до 12 часов, время в режиме ожидания – до 72 часов, время открытия/закрытия кисти – 0,5 сек., съемный аккумулятор с полной зарядкой работает в течение 2-х часов [13].

В настоящее время «Моторика» выпускает три разновидности бионических протезов: протез предплечья INDY Hand, в котором скоростью и силой схвата можно управлять пропорционально силе напряжения мышц (можно брать хрупкие предметы), зарядка аккумулятора около 3 часов, есть возможность встроить бесконтактную оплату покупок, экран, GSM-модуль и многое другое; протез MANIFESTO Hand (в 2019 г. начаты пилотные испытания) предполагает использование до 14 жестов, можно задать до 30 различных видов схвата, есть возможность настройки дополнительных функций; протез пальцев и кисти MANIFESTO Fingers предназначен для врожденных и ампутированных травм кисти или 3–5 пальцев, проектируется индивидуально по размерам руки и изготавливается по современным технологиям 3D-печати, переключение жестов от мио сигналов на 30 различных видов схвата, (задаются через мобильное приложение), 5 преднастроенных жестов [13].

АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БИОНИЧЕСКИХ ПРОТЕЗОВ РУК

Для анализа взаимосвязи основных характеристик бионических протезов в работе были выделены модели, схожие по принципу работы и предназначенные для выполнения одинаковых задач – протезы рук. Рассматривались бионические протезы рук четырех основных производителей: Touch Bionics – бионическая рука i-Limb (три поколения); RSL Steeper – бионическая рука beBionic (три поколения); Otto Bock – бионические руки MyoFacil и Michelangelo. Был проведен анализ взаимозависимости основных характеристик бионических протезов рук, таких как: емкость аккумулятора, мАч; число типоразмеров; максимальный предел нагрузки на кисть, кг (статический); предел несущей нагрузки на пальцы (статический); время от открытия полного силового схвата, сек.; число предопределенных видов схвата; сила схвата (встречный захват); сила схвата (боковой захват); скорость хвата, мм/сек; сила схвата (нейтральный захват); ширина раскрытия, мм; вес минимальный, г; вес максимальный, г; вес средний, г; стоимость, долл.

Рассматривались связи между весом бионической руки и такими показателями, как число предопределенных видов схвата, максимальный предел нагрузки на кисть (статический), предел несущей нагрузки на пальцы (статический); время от открытия до полного силового схвата (рис. 1, 2).

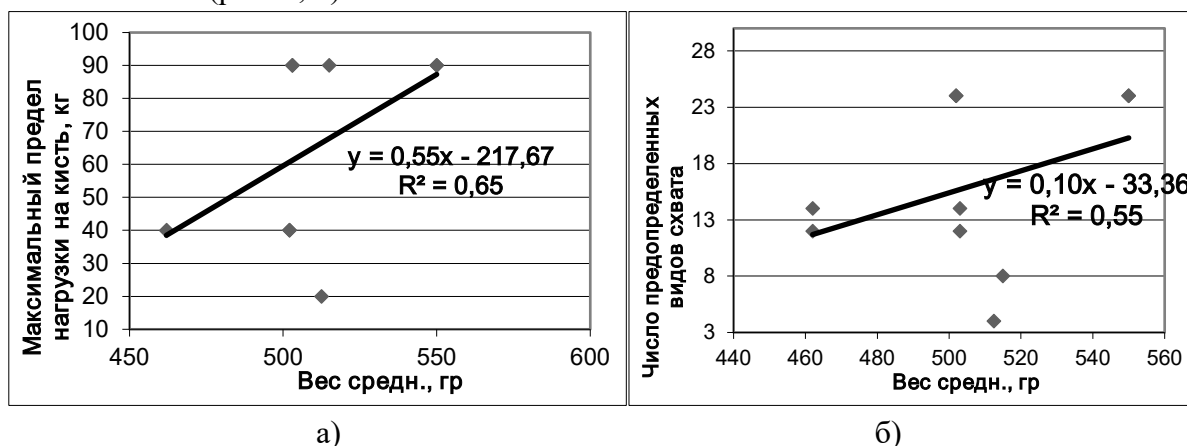


Рис. 1. Зависимость среднего веса бионической руки i-Limb от максимального предела нагрузки на кисть, кг (а) и числа предопределенных видов схвата (б)

Источник: авторская разработка по данным [12].

Анализ взаимосвязи основных характеристик бионических протезов в работе проводился на основе данных компании Touch Bionics (до 2016 г.) и Ossur (2017–2020 г.), выпускающих бионический протез рук L-limb.

Расчеты проводились для веса максимального, среднего и минимального (зависит от комплектации) для данного класса бионических протезов (выборка из 12 бионических рук). Были получены следующие зависимости среднего веса бионической руки без учета веса аккумулятора (Y) от времени от открытия до полного силового схвата, сек. (x_1), числа предопределённых видов схвата (x_2):

$$Y^{st} = 542,5 - 23,97 x_1 + 1,49 x_2, R^2 = 0,85,$$

$$Y^s = 511 - 62,6 x_1 + 2,39 x_2, R^2 = 0,76,$$

где индекс *st* относится к биопротезам стандартного размера, *s* – к биопротезам размера extra small. Основным результатом проведенного анализа состоит в том, что современные бионические протезы имеют достаточные для различных бытовых действий функциональные возможности; однако с увеличением числа predetermined видов схватов и снижением времени от открытия до полного силового схвата растет вес бионической руки. Результаты проведенного моделирования показали, что выявленные зависимости характерны как для рассматриваемых поколений биопротезов в целом, так и для вариантов биопротезов внутри одного поколения.

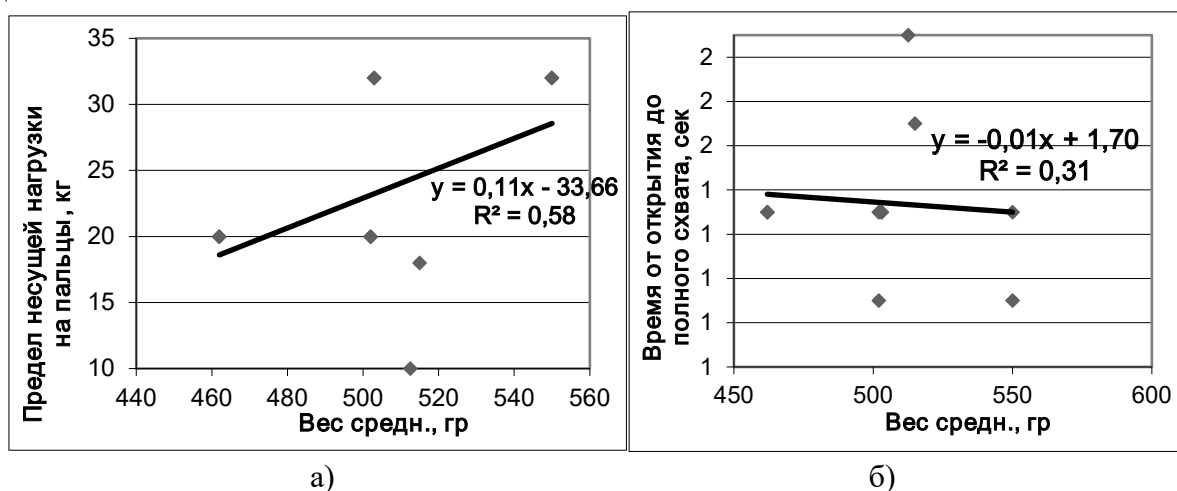


Рис. 2. Зависимость среднего веса бионической руки i-Limb от предела несущей нагрузки на пальцы, кг (а) и времени от открытия до полного силового схвата (б)

Источник: авторская разработка по данным [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ современных бионических протезов и экзоскелетов показал, что они имеют достаточный для различных бытовых действий функционал. Разработчики сфокусированы на оптимизации строения протезов, однако анализ взаимосвязи основных характеристик бионических протезов показывает, что с улучшением функций кисти, таких как увеличение числа predetermined видов схвата, максимального предела нагрузки на кисть и предела несущей нагрузки на пальцы (статический), снижение времени от открытия до полного силового схвата, также возрастает вес бионической руки. Таким образом, совершенствование основных характеристик бионической руки из поколения в поколение влечет за собой рост массы изделия, что отрицательно сказывается на потребительских качествах данного вида протезов. Решение этой проблемы в будущем многие разработчики связывают с применением инновационных сверхлегких материалов, что возможно повлечет за собой увеличение стоимости биопротезов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варшавский А.Е., Дымова И.А. Проблемы развития рынка роботизированных технологий // Математика. Компьютер. Образование: Сб. научн. трудов. Выпуск 17, Том 2 / Под. ред. Г.Ю. Ризниченко. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. С. 43–49.

2. Комкина Т.А. Особенности развития рынка роботизированных хирургических систем // Научно-практический журнал «Концепции». 2017. № 1 (36). С. 29–36.
3. Global Wearable Robotic Exoskeleton Market – Analysis and Forecast (2017–2026), Oct. 2017
4. Ekso Bionics. URL: <http://eksobionics.com> (дата обращения: 17.05.2022).
5. Cyberdyne. URL: <http://www.cyberdyne.jp/english> (дата обращения: 17.05.2022).
6. Rewalk. More Than Walking. URL: <http://www.rewalk.com> (дата обращения: 17.05.2022).
7. Экзореабилитация. URL: <http://www.exoatlet.ru/rehabilitation> (дата обращения: 17.05.2022).
8. Aman M, Festin C, Sporer ME, et al. Bionic reconstruction: Restoration of extremity function with osseointegrated and mind-controlled prostheses. *Wien Klin Wochenschr.* 2019; 131 (23–24): 599–607. doi:10.1007/s00508-019-1518-1.
9. Armstrong T.W, Williamson MLC, Elliott TR, Jackson WT, Kearns NT, Ryan T. Psychological distress among persons with upper extremity limb loss. *Br J Health Psychol.* 2019; 24 (4): 746–763. doi:10.1111/bjhp.12360.
10. The Amputee Coalition is a national nonprofit organization. URL: <http://www.amputee-coalition.org> (дата обращения: 17.05.2022).
11. Össur Company <https://www.ossur.com/corporate/about-ossur/ossur-news> (дата обращения: 17.05.2022).
12. Touch Solutions. URL: <https://www.ossur.com/en-gb> (дата обращения: 17.05.2022).
13. Компания «Моторика» URL: <http://motorica.org/rossiya-na-cyubathlon-2016> (дата обращения: 17.05.2022).
14. BeBionic Specifications. URL: <https://www.manualslib.com/manual/1545074/BeBionic-BeBionic-3.html?page=7#manual> (дата обращения: 06.09.2022).

ГЛАВА 16.

РАСШИРЕНИЕ СПРОСА НА ОТДЕЛЬНЫЕ ВИДЫ РОБОТОТЕХНИКИ В МЕДИЦИНЕ, ВЫЗВАННОЕ ЭПИДЕМИЕЙ КОРОНАВИРУСА

ВВЕДЕНИЕ

Сектор здравоохранения активно меняется вследствие появления прорывных изобретений в диагностике и лечении заболеваний. Одновременно с этим приходится решать целый комплекс актуальных проблем, связанных со старением населения, ростом затрат и дефицитом медицинского персонала во всем мире. Также современные технологии могут помочь решить некоторые проблемы, вызванные COVID-19, в частности проблемы безопасности и нехватки персонала в учреждениях здравоохранения способствуют сдерживанию распространения коронавируса, ограничивая контакты потенциальных носителей вируса со здоровыми людьми. Однако в настоящее время сложно строить прогнозы по распространению высокотехнологичной медицинской робототехники в долгосрочной перспективе [1, 2]. В данном разделе рассмотрены проблемы развития роботов для дезинфекции, роботов-помощников и логистических медицинских роботов. Глава подготовлена на основе статьи*.

РОБОТЫ ДЛЯ ДЕЗИНФЕКЦИИ

Роботы-дезинфекторы начали применяться в больницах для дезинфекции палат и коридоров с помощью ультрафиолета или специальных растворов и до вспышки вирусной инфекции, вызванной COVID-19. Однако в 2020 г. этот вид медицинских роботов получил стремительное развитие, роботов-дезинфекторов начали выпускать многие компании, а их сфера применения значительно расширилась. В 2017 г. общий объем рынка роботов-дезинфекторов составлял 67 млн долл. При этом среднегодовой темп роста данного вида роботов для Китая, по некоторым прогнозам, должен был составить около 28% до 2022 г. – 164 млн долл. за пять лет. В свете последних событий, происходящих в мире, размер мирового рынка роботов для дезинфекции может вырасти на 429,25 млн долл. в течение 2020–2024 гг. [3]. Лидерами по новым разработкам роботов-дезинфекторов в настоящее время являются Китай и США, однако вспышка новой коронавирусной инфекции способствовала активизации новых разработок в других странах.

Данный вид роботов передвигается самостоятельно или управляется удаленно оператором, оснащен лидарами (технологией дистанционного зондирования), может сканировать и строить карты помещения. Роботы-дезинфекторы выполняют задачи по обеззараживанию помещений в амбулаторных и операционных отделениях больниц с целью минимизации контакта между врачами и пациентами для снижения риска перекрестного заражения.

* Комкина Т.А., Дубинина М.Г. Анализ особенностей развития и распространения сервисной робототехники в период пандемии коронавируса // Экономический анализ: теория и практика. 2021. Т. 20. Вып. 7. С. 1321–1342. <https://doi.org/10.24891/ea.20.7.1321>

Следует отметить наличие значительной конкурентной среды на рынке дезинфицирующих роботов. Ниже приведены примеры наиболее крупных производителей роботов в данном направлении.

Blue Ocean Robotics (Дания) включена в список 50 самых влиятельных робототехнических компаний мира (RBR50), выпускает дезинфицирующих роботов серии UVD (производится с 2018 г.), в настоящее время занимает более 75% мирового рынка автономных мобильных роботов для дезинфекции. UVD Robots сочетает в себе технологии автономных роботов и ультрафиолетового излучения, может уничтожить 99,9% всех бактерий в течение 10 мин, имеет покрытие 360°, УФ-длина волны 254 НМ (UV-C light), время работы от одной зарядки УФ модуля 2–2,5 часа (9–10 помещений), время работы мобильной платформы до 8 часов, время зарядки аккумулятора 6 часов, вес 140 кг, связь осуществляется на основе Wi-Fi и приложения [4].

Finsen Technologies Ltd. (Великобритания) выпускает высокопроизводительного робота для дезинфекции ультрафиолетом THOR UVC (производится с 2011 г.), обладает уникальными запатентованными конструктивными особенностями, снижает количество вредных бактерий на 99,9% за несколько минут, легко транспортируется и является полностью мобильным, что делает его оптимальным для дезинфекции машин скорой помощи, комнат пациентов, операционных залов и других помещений в больнице (включая небольшие помещения), имеет покрытие 360°.

Xenex Disinfection Services LLC (США, 2009 г.) выпускает дезинфицирующих роботов Xenex LightStrike™ Robot и Xenex, LightStrike™ Disinfection Pod™ (портативная модель). Следует отметить, что роботы-дезинфекторы Xenex (производятся с 2012 г.) начали активно использоваться в стационарах в США в 2015 г. для борьбы с вирусом Эбола. Корпорация Xenex во время пандемии помимо американских больниц поставляла дезинфицирующих роботов пятого поколения в более чем 500 больниц Китая, а также в больницы Италии, Испании, Германии и другие страны. По данным [4] в первом квартале 2020 г. по сравнению со всем 2019 г. рост числа заказов на LightStrike составил 400%. В Xenex LightStrike применяется ксеноновая лампа (УФ-излучение без ртути, совмещенное с импульсной технологией, создающей высокоинтенсивные сигналы) с полным бактерицидным спектром (200-315 нм), особая система фокусировки ультрафиолетового света, система записи на устройстве и онлайн-управление для отслеживания и анализа, встроенный таймер, кнопка экстренного выключения, система автоматического выключения при определении движения, скорость уничтожения вируса SARS-CoV-2 на 1 метре для твердых поверхностей составляет 2 мин., для респираторов 5 мин.

Mediland Enterprise Corp. (Тайвань) выпускает неавтономного робота для дезинфекции UV Light Disinfection Robot (с 2016 г., перемещение осуществляется человеком) и новую серию роботов Hyper Light R (может перемещаться по заранее установленному маршруту). Эти роботы имеют высокую мощность излучения, длительный срок службы и стабильную мощность, запатентованные вращающиеся защитные отражатели; робот обеспечивает эффективную дезинфекцию участков подверженных коронавирусу, деактивирует ДНК и РНК коронавирусов (включая новый коронавирус) за пять минут в радиусе 5 метров, имеется возможность хранить информацию по работе робота-дезинфектора на удаленных платформах и в облачном хранилище.

Вирусная инфекция, вызванная COVID-19, значительно повлияла на активизацию разработок роботов-дезинфекторов многими компаниями. Так, во время пандемии крупнейший производитель сельскохозяйственных дронов компания XAG (Китай) начала переоборудование наземных роботов и воздушных беспилотников сельскохозяйственного назначения в дезинфицирующие опрыскиватели (более 2600 дронов) [5]. Ведущая китайская компания по производству промышленных и складских роботов Casun на фоне борьбы с пандемией разработала и начала массовый выпуск робота-дезинфектора ARIS K2, который может применяться для обработки больших площадей; для перемещения робота применена интеллектуальная лазерная SLAM навигация с построением карты помещения для обработки всех его частей со многих точек. ARIS K2 работает как в режиме обеззараживания (мощность УФ-излучения составляет до 270 мкВт/см²), так и в режиме теплового мониторинга (инфракрасный монитор измеряет показатели температуры тела, что позволяет выявлять людей с повышенной температурой) [6].

После начала пандемии многие компании, специализирующиеся на выпуске автоматических управляемых тележек (транспортер с электроприводом, предназначенный для перемещения грузов (AGV)), начали переоборудовать их, в том числе в роботов-дезинфекторов, снабжая их датчиками присутствия человека и УФ-лампами. Степень автономности роботов и технические характеристики зависят от вида платформы, на которой они созданы. В Китае в разгар пандемии роботизированные платформы, управляемые операторами, распыляли дезинфицирующие средства в жилых районах в г. Ухань; для дезинфекции больших площадей в г. Ханчжоу применялись гусеничные роботы под управлением операторов.

В мире многие стартапы анонсировали начало производства роботов-дезинфекторов. Разработчики из МТИ (Массачусетский технологический институт, США) на базе готовой платформы от компании Ava Robotics разработали робота с четырьмя УФ-лампами и покрытием 360°, который работает в автоматическом режиме; его производительность составляет 380 м² за 30 мин., скорость передвижения 0,5 км/ч, имеется докстанция для подзарядки. В России лаборатория робототехники Сбербанка на базе робота-курьера разработала прототип робота-дезинфектора, который оборудован УФ-лампами суммарной мощностью 100 Вт, производительностью 20 м² за 5 мин., при этом возможно применение как удаленного управления, так и через экран-дисплей и голосовые сообщения. Данный робот-дезинфектор может работать в автоматическом режиме, безопасен. Сейчас данный прототип проходит проверку в офисах банка и в Европейском медицинском центре, по итогам тестирования будет принято решение о масштабировании проекта и его применении за пределами банка. Однако делать прогноз о массовом производстве таких роботов пока не представляется возможным.

Проведенный анализ показывает, что всех роботов-дезинфекторов последнего поколения объединяет наличие мощных УФ-ламп, быстрое время обработки (не более 15 мин.), автоматический расчет времени обработки, наличие защитных систем для человека, наличие контроля за результатами обработки (встроенные или внешние сенсоры УФ).

МОБИЛЬНЫЕ РОБОТЫ-ПОМОЩНИКИ

Одним из направлений автоматизации медицинских учреждений в условиях пандемии, требующей быстрого решения, оказалось применение роботизированных систем для взаимодействия в реальном времени с пациентами с безопасного расстояния на базе технологии 5G (операторами связи специально для этих целей были развернуты сети пятого поколения в медицинских центрах). Таким образом, они эффективно восполняют дефицит большинства медицинских клиник в персонале, улучшают возможности предварительного обследования в клиниках и снижают риск заражения, в том числе медицинского персонала. Роботизированные автономные системы начали использоваться также в общественном транспорте в Китае, Сингапуре и других городах во время вспышки вирусной инфекции, вызванной COVID-19. Эти роботизированные системы используются для измерения температуры и распознавания лиц (данные передаются в службу мониторинга и отслеживается обращение пассажиров с повышенной температурой в медицинские учреждения).

В условиях вспышки эпидемии коронавируса нового типа активно стали использоваться и модернизироваться роботы-телеоператоры. В Китае техническую поддержку применения данных видов роботов предоставляет созданная Народной больницей провинции Чжэцзян, телекоммуникационным оператором China Telecom и компанией Huawei «Лаборатория интеллектуальных медицинских инноваций 5G». Ультразвуковое исследование сердечной и легочной систем позволяет получать изображения объемом до 2 Гб с высокой скоростью передачи и низкой задержкой во времени за несколько минут. Так, с помощью созданного на базе технологии 5G робота-телеоператора с роботизированной рукой врачи во временном госпитале г. Ухань (Китай) в феврале 2020 г. провели первое ультразвуковое сканирование в режиме реального времени для пациента, находясь при этом в больнице на расстоянии более 700 км; врачи управляли роботизированной рукой, проводя дистанционное ультразвуковое сканирование через сеть 5G.

В Китае во время эпидемии в г. Ухань в учебном полевом госпитале было создано полностью роботизированное отделение, в котором пациенты проходили обследование и лечение удаленно, использовалась при этом сеть 5G. Были применены роботы, разработанные и произведенные китайской компанией CloudMinds совместно с крупной телекоммуникационной компанией China Mobile, которые осуществляли дистанционный уход за пациентами, измерение температуры тела, дезинфекцию и очистку, доставляли лекарства, утилизировали медицинские отходы.

Медицинского робота-помощника разработала компания TMiRob, специализирующаяся на создании медицинских роботов различного назначения (в том числе роботов-дезинфекторов, см. выше). В его функции входит как взаимодействие с пациентами, так и амбулаторными отделениями внутри больницы. Робот с помощью голоса или анимации взаимодействует с пациентом (уточняет методы ухода, процедуры лечения и т.д.), осуществляет бесконтактное измерение температуры лба в режиме самообслуживания, использует несколько режимов идентификации для помощи медперсоналу по сбору и вводу информации о пациенте (автоматическое распознавание лица, ID-карты, медицинской страховки, банковской карты, RFID-браслета и других удостоверений личности), обеспечивает навигацию по территории медицинского учреждения (через распознавание QR-кода), осуществляет

печать информации с помощью встроенного термопринтера, проводит дистанционные консультации между пациентами и медицинским персоналом [7]. Следует отметить, что компанией TMI Rob для потребностей ядерной медицины была разработана и внедрена в производство медицинская роботизированная система для обнаружения и лечения пациентов с радиационным заражением для бесконтактной работы медицинского персонала при проведении ежедневных осмотров. Данный вид мобильного робота оснащен различным медицинским оборудованием (сфигмоманометром, термометром, счетчиком Гейгера) для динамического контроля за пациентами, ежедневной доставки лекарств и расходных материалов, измерения радиоактивности в помещении и содержания радиоактивных изотопов йода в организме человека, дистанционной консультации между пациентами и медицинским персоналом. Все это помогает оптимизировать эффективность работы медицинского персонала, снизить его радиационное заражение, обеспечить безопасность пациентов и улучшить качество медицинского обслуживания [7].

Интерес представляет медицинский робот-манипулятор, созданный для защиты медицинского персонала во время лечения пациентов с вирусными инфекциями в университете Цинхуа (Китай) на основе технологии внешних манипуляторов, уже применявшихся для работ в открытом космосе. Аппарат представляет собой роботизированную руку на колесах, которая выполняет УЗИ, проводит мониторинг дыхательных путей, берет мазки изо рта, контролирует работу внутренних органов. Данный робот-манипулятор оснащен несколькими видеокамерами с высоким разрешением, является полностью автоматизированным и может дезинфицировать себя после контакта с больным. Стоимость такого робота составляет 72 тыс. долл. (в дальнейшем возможна государственная поддержка при закупке робота медицинскими учреждениями).

Компания TCI Gene (Тайвань) совместно с Министерством здравоохранения и социального обеспечения всего за два месяца благодаря нескольким запатентованным технологиям других тайваньских компаний разработала и приступила к производству робота QVS-96 для проверки на вирусы. Роботизированный антивирусный сканер проверяет на наличие вируса в 7 раз быстрее, чем существующие на данный момент методы с точностью 99,9%, может работать 24 часа в сутки, каждый робот может проводить 900 тестов в день, а это означает, что только четыре таких робота способны удовлетворить общенациональный спрос на тестирование на коронавирус в стране [8].

Проведенный анализ медицинских роботов-помощников показывает, что в условиях борьбы с коронавирусом это направление получило мощный стимул к развитию, в новых роботизированных системах используется технология 5G, системы распознавания лиц, усовершенствованные системы навигации, при этом стоимость таких роботизированных систем очень значительна для массового внедрения медицинского робота-помощника в больницы без субсидий со стороны государства.

ЛОГИСТИЧЕСКИЕ МЕДИЦИНСКИЕ РОБОТЫ

Логистические медицинские роботы относятся к сервисным роботам, позволяют автоматизировать работу персонала больницы, используются для доставки лекарств и других предметов в медицинских учреждениях, могут быть интегрированы в систему

распределения и учета лекарств, позволяют путем оптимизации повысить производительность и высвободить рабочую силу. Использование мобильных медицинских роботов может сократить время ожидания, потребность в перемещении персонала. Ниже приведены примеры логистических медицинских роботов, производство которых уже начато.

Робот-доставщик HOSPI выпускается компанией Panasonic (Япония) и был изначально разработан в 2004 г. для использования в здравоохранении в условиях быстрого старения населения Японии [9]. В 2013 г. была выпущена новая версия робота, успешно прошедшая испытания и компанией, был начат массовый выпуск роботов данного вида для больниц и гостиниц. Робот обладает автономными навигационными системами, оснащен встроенным датчиком и усовершенствованной системой предотвращения столкновений [10]. HOSPI предназначен для доставки хрупких и громоздких лекарств, медицинских анализов и образцов, историй болезни пациентов в формате 24/7; оснащен системой безопасности для предотвращения взлома, кражи и повреждения во время доставки (доступ с ID-картой). Навигационная система позволяет роботу самостоятельно передвигаться благодаря загруженным картам, камере и встроенным датчикам; скорость (max) 1,0 м/сек; вес (с батареей) около 170 кг; время зарядки 4,5 часа; длительность работы 9 часов; загрузка (max) 20 кг (6 медицинских поддонов размера А3).

Логистические роботы TransCar и Relay® производятся концерном Swisslog (Швейцария, входит в KUKA Group), используются в медицинских учреждениях многих стран (Норвегии, Китая, Австрии, Великобритании, Германии, России). Робот-доставщик TransCar создан на базе автоматизированных управляемых транспортных средств (AGV), оборудован датчиками распознавания препятствия, системой Wi-Fi, может пользоваться лифтами. Relay® – автономный робот, предназначенный для работы в общественных местах, доступных для посетителей больниц, имеет блокируемый отсек для грузов, динамичную и безопасную навигацию (плавно перемещается по неструктурированным участкам при помощи лазерной навигации, машинного зрения, беспроводной связи и оптимизированной маршрутизации), время зарядки 2 часа; длительность работы 4 часа [11]. Может доставлять лекарства, лабораторные образцы, расходные материалы и оборудование в больничной среде.

Автономный мобильный робот TUG производится компанией Aethon (США), может использоваться в любых отделениях больницы в режиме многозадачности. На платформу робота из нержавеющей стали можно погружать различные предметы, можно транспортировать материалы в специальных ячейках, доступ к которым открывается только после биометрического сканирования или введения кода безопасности; для управления используется облачный центр контроля, автономная технология смарт-навигации (совмещенный лазер, звуковой локатор и инфракрасные датчики), длительность работы 10 часов; тяговое усилие (max) – 453 кг; радиус поворота – 80,5 см [12]. TUG может использоваться в фармацевтическом отделе (доставлять лекарства в защищенном режиме), лабораториях (доставлять образцы крови или тканей в закрытых ячейках из разных точек в главную лабораторию), столовой, прачечной и др.

Мобильный коллаборативный робот YuMi производится в Медицинском исследовательском центре ABB Group на базе Института инноваций Техасского медицинского центра (ТМС) в Хьюстоне. Робот предназначен для выполнения разнообразных повторяющихся длительных операций, например подготовки лекарств, загрузки и разгрузки центрифуг,

дозирования по каплям, обработки жидкостей, сбора и сортировки пробирок и т.п. Помимо этого, мобильный робот YuMi может быть задействован в логистике больниц (выдавать лекарства, доставлять их в нужное место, подвозить медикаменты или постельное белье).

Проведенный анализ логистических медицинских роботов показал, что наиболее важными их характеристиками являются длительность времени работы (без подзарядки), время зарядки, скорость, современная система безопасности (для предотвращения несанкционированного доступа к содержимому робота) и система навигации. Проведенный компанией АВВ анализ показывает, что средства автоматизации могут ускорить выполнение повторяющихся задач на 50% по сравнению с ручным трудом в больницах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В сложившейся ситуации на фоне пандемии COVID-19, возможно, поставщики медицинских услуг, потребители и компании проявят больший интерес к дальнейшему использованию медицинских роботов. Их применение в медицинских учреждениях решает такие важные задачи как уменьшение риска распространения вирусов, снижение нагрузки на медицинский персонал, сокращение времени обработки помещений и улучшение качества дезинфекции помещений. Роботизированные системы облегчают выполнение рутинных процедур в медицинских учреждениях, могут работать непрерывно, обеспечивая при этом высокую производительность, что в свою очередь, позволяет увеличить их пропускную способность, повысить качество и минимизировать затраты на лечение.

Следует отметить, что у российских производителей также есть примеры разработок беспилотных дезинфекторов, курьеров, бесконтактных измерителей температуры, роботов-помощников врачей. Однако практически все эти разработки еще проходят стадию тестирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варшавский А.Е., Дымова И.А. Проблемы развития рынка роботизированных технологий // Математика. Компьютер. Образование: Сб. научн. трудов. Вып. 17. Т. 2 / под. ред. Г.Ю. Ризниченко. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. С. 43–49.
2. Комкина Т.А. Особенности и перспективы развития медицинской робототехники / Научно-практический журнал «Концепции». 2015. № 1 (33). С. 25–33.
3. Environmental Disinfection Robot Market by Technology and Geography – Forecast and Analysis 2020–2024, Apr 2020. URL: <https://www.technavio.com/report/environmental-disinfection-robot-market-industry-analysis> (дата обращения: 17.05.2022).
4. UVD Robots ApS. URL: <https://www.uvd-robots.com> (дата обращения: 17.05.2022).
5. XENEX Disinfection Systems. URL: <https://www.xa.com/en/news> (дата обращения: 17.05.2022).
6. NISSA Engineering. URL: <https://nissa-eng.ru/> (дата обращения: 17.05.2022).
7. TMI Robotics. URL: <http://tmirob.com/solutions> (дата обращения: 17.05.2022).
8. Taiwan News. URL: <https://www.taiwannews.com.tw/en/news/3928285> (2020/05/05)/ (дата обращения: 17.05.2022).
9. Falconer J. HOSPI-R drug delivery robot frees nurses to do more important work». URL: <https://newatlas.com/panasonic-hospi-r-delivery-robot/29565/> (дата обращения: 06.09.2022).
10. Szondy D. Panasonic robots take temp jobs at airport and hotel. URL: <https://newatlas.com/panasonic-hospir-robot-hotel-airport/47390/> (дата обращения: 06.09.2022).
11. Swisslog. Системы автоматизации для медицинских учреждений, складов и распределительных центров. URL: <https://vk.com/swisslog> (дата обращения: 17.05.2022).
12. ST Engineering Aethon, Inc. URL: <https://aethon.com/products> (дата обращения: 17.05.2022).

ГЛАВА 17. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РОБОТОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

ВВЕДЕНИЕ

Численность занятых в строительной отрасли во всем мире составляет около 7% от общей численности занятых [1]. Исследователи компании ResearchAndMarkets [2] оценивали объем продаж мировой строительной отрасли в 11,5 трлн долл. в 2020 г. и прогнозируют его рост до 16,6 трлн долл. в 2025 г.

В последние 40 лет производительность труда в строительстве снижалась, при этом в 70-х – начале 80-х гг. это снижение составляло 1,5% ежегодно, что объясняется ростом среднего возраста рабочих, снижением уровня квалификации рабочей силы и ростом миграции (особенно среди молодых работников) [3].

Рост производительности труда в строительном секторе в течение последних двух десятилетий составлял в среднем 1% в год по сравнению с 2,8% в мировой экономике и 3,6% в обрабатывающей промышленности [4]. Этот показатель после COVID-19 снизился до 0,5% во всем мире. Согласно исследованию Forbes, спад различается в зависимости от страны: в США ожидается снижение производительности труда на 0-8%, в Италии – на 10–28% [5].

Тенденции развития строительства после COVID-19 включают более высокие уровни применения сборных конструкций, рост числа дронов для геодезической съемки и рост строительства за пределами строительной площадки. По прогнозам, объем строительства не достигнет уровня 2019 до 2023 г. [6].

Отрасль характеризуется большим потреблением сырья и энергии в процессах строительства и производства строительных изделий. Снижение производительности труда в строительстве и отставание отрасли от средних показателей для экономики стимулировали исследования для изменения сложившихся тенденций. Главный упор был сделан на роботизацию и автоматизацию строительных процессов, так как наблюдается общая тенденция снижения численности и квалификации инженерно-технических кадров (см., например, [7]), качества среднего образования [8]. Нехватка строительных рабочих приводит к задержке сроков строительства и сдачи готовых зданий. В то же время повышается риск травматизма. Робототехнические системы могут обеспечить дополнительную безопасность, а также более высокий уровень эффективности и стабильное качество выполняемых работ. Глава подготовлена на основе статьи автора*.

Строительные роботы предназначены для увеличения скорости и повышения точности строительных работ. Они имеют свои особенности по сравнению с промышленными роботами. В промышленном производстве используют, как правило, стационарных роботов для работы на конвейере, где легче добиться автоматизации производства, потому что каждый продукт идентичен и требует выполнения одинаковых задач.

* Дубинина М.Г. Использование роботов в строительстве // Научно-практический журнал «Концепции». 2015. № 2 (34). С. 36–45.

К строительным роботам предъявляются гораздо более широкие и сложные требования по сравнению с промышленными. Они должны перемещаться по стройке, быть снабжены двигателями или аккумуляторами для перемещений и работы. Строительные роботы также сталкиваются с изменяющимися условиями площадок и должны быть перепрограммированы для каждой новой ситуации. Они должны быть в состоянии функционировать в неблагоприятных погодных условиях, включая изменения влажности и температуры. Кроме того, они постоянно подвергаются воздействию пыли и грязи. Все эти факторы объясняют повышенные требования к функциональным возможностям строительных роботов и сложность их разработки.

По данным IFR, в 2003 г. на долю строительных роботов приходилось почти 8% мирового рынка профессиональных сервисных роботов, однако в парке профессиональных сервисных роботов доля строительных сократилась с 20,2% в 2002 г. до 10% в 2006 г., а их доля в ежегодных отгрузках снизилась с 9,8% в 2003 г. до 3,1% в 2013 г. [9]. Тем не менее, в настоящее время развитию строительных роботов уделяется особое внимание.

КЛАССИФИКАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ РОБОТОВ

Строительные роботы разделяются на две основные группы: роботы для возведения зданий и роботы для гражданской инфраструктуры. Типичными областями применения роботов для гражданской инфраструктуры являются автоматизация дорог, тоннелей, мостового строительства, земляных работ и т.д. В строительстве зданий главными областями применения являются возведение каркаса зданий, монтаж, уплотнение бетона, процессы отделки интерьера и т.д.

Существуют и другие виды классификаций, например, по характеру выполняемых роботами задач. В каталоге International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC) выделены следующие группы строительных роботов [10]: демонтажные роботы, роботы для геодезических работ, роботы-экскаваторы и машины для земляных работ, роботы для дорожных работ, роботы для прокладки туннелей, автоматизированные бетономешалки, роботы для выравнивания бетона, краны и автономные грузовики, роботы для сварки и укладки металлоконструкций, огнезащитные и покрасочные роботы, роботы для инспекции и технического обслуживания сооружений, интегрированные робототехнические системы.

ДЕМОНТАЖНЫЕ РОБОТЫ

Одними из первых видов полностью реализованных роботов в строительстве были демонтажные роботы, которые используются для сноса старых конструкций. Коммерческих дистанционно управляемых роботов для сноса производят крупные фирмы, такие как Brokk и Husqvarna. Эти роботы способны разрушить стены, бетон и разрезать арматуру. В настоящее время компания Brokk, например, выпускает 12 различных моделей таких роботов, начиная с самого маленького Brokk 60 высотой до 1 м и массой 500 кг, и заканчивая Brokk 800 высотой более 2,6 м и массой 11,3 т. Эти машины выглядят как мини-экскаваторы, но без кабин. Они могут быть снабжены дробилками, сверлами или ковшами.

Некоторые модели достаточно малы, чтобы поместиться в пассажирских лифтах или пройти через стандартные дверные проемы. Операторы контролируют действия роботов дистанционно с помощью джойстиков. Цена самых маленьких демонтажных роботов составляет более 100 тыс. долл. и возрастает с увеличением размеров роботов. Их стоимость оправдывается значительным увеличением эффективности и производительности работ, особенно для ограниченных пространств.

В настоящее время на рынок готовы выйти новые классы инновационных роботов для сноса. Они способны сканировать окружающую среду, спланировать и аккуратно разрушить здание без существенного вмешательства человека. Одна из таких систем разработана в Швеции. Модель роботизированной системы сноса с высокой энергетической эффективностью называется ERO Concrete Recycling Robot. Она способна автоматизировать снос зданий и утилизировать отходы [11].

РОБОТЫ-УКЛАДЧИКИ КИРПИЧЕЙ И ЦЕМЕНТА

В соответствии с прогнозом Федерального бюро статистики труда США (BLS), занятость каменщиков в стране вырастет на 34% с 2012 по 2022 г. (значительно быстрее, чем в среднем по всем профессиям). Всего в США в 2012 г. по этой специальности трудились 85,1 тыс. человек [12]. Работа каменщиков является достаточно травмоопасной, поэтому использование роботизированных систем способно облегчить труд рабочих и снизить риск получения травм. Созданием таких систем занимается целый ряд фирм.

Коммерчески доступного робота-каменщика SAM разрабатывает компания Construction Robotics (США). Этот робот может уложить до 1500 кирпичей в день, что сопоставимо с работой трех человек без перерыва. Он предназначен для оказания помощи в повторяющихся и тяжелых работах по подъему и размещению каждого кирпича. Человек-каменщик будет продолжать отвечать за конечное качество построенной стены, но применение робота будет способствовать повышению эффективности производства. При этом обеспечиваются следующие преимущества [13]: экономия рабочих мест более чем на 30%, снижение физической нагрузки на каменщика и бригаду, снижение вредных воздействий на здоровье и обеспечение безопасности рабочей силы, последовательное повышение производительности труда.

В 2015 г. робот-каменщик SAM100 производства компании Construction Robotics, который может укладывать до 3 тыс. кирпичей в день, получил приз World of Concrete's 2015 Most Innovative Product Award, ежегодной премии в бетонной промышленности.

Еще одна система, которая в настоящее время проходит тестирование на возможность автономного строительства, использует технологию Contour Crafting [14]. Технология, разработанная в университете Южной Калифорнии, представляет собой гигантский 3D-принтер. Сначала укладываются рельсы по периметру будущего здания, на которые устанавливают робота-укладчика, похожего на козловой кран, применяемый в строительстве. По заложенной программе в течение суток робот возводит полые стены здания, которые затем наполняет бетоном. По оценке разработчиков, строительство с использованием этой системы может сократить расходы на 80% за счет устранения отходов.

Компания Fastbrick Robotics (Австралия) около 10 лет занимается разработкой робота-укладчика кирпичей, который может сортировать их в условиях невидимости. Робот Hadrian может работать непрерывно при условии обеспечения материалами, укладывая 1000 кирпичей в час по чертежам САПР. Робот снабжен системой лазерного наведения, может работать от электрогенератора или любого другого источника на стройплощадке. Использование роботизированной системы значительно сокращает расходы на строительство и позволяет возводить каркас нового дома за 2–3 дня. Вся система мобильна и может использоваться в любом месте. Стоимость разработки составляет 7 млн долл. Компания стремится коммерциализировать запатентованную технологию робота-укладчика, способного возвести дом по спроектированной компьютером структуре, от начала до конца. Система обеспечивает автоматическую загрузку, резку, фрезерование и размещение всех кирпичей [15]. Компания Fastbrick Robotics получила грант австралийского федерального правительства наряду с группой австралийских компаний, специализирующихся в производстве кирпича и цемента.

Перечисленные технологии еще далеки от производства готовых домов. Они способны возводить стены, но проложить инфраструктуру в здании по-прежнему требует квалифицированной работы человека. Вполне вероятно, что в будущем строительные роботы смогут выполнять все виды работ.

Лаборатория Future Cities Laboratory в Singapore-ETH Centre в сотрудничестве с компанией ROB Technologies AG разрабатывает робота-укладчика плитки. Прототип роботизированной машины был испытан Советом содействия развитию жилищного строительства в Сингапуре в государственном жилищном строительном проекте. Предполагается, что коммерческая версия робота позволит в 4 раза увеличить производительность труда. Ее пуск планировался на конец 2015 г. [16].

РОБОТЫ-ПОМОЩНИКИ НА СТРОЙКЕ

Развитие роботизации сопровождается дискуссиями о социальных последствиях внедрения роботов [17]. Часть исследователей опасается, что в строительной отрасли роботы могут вытеснить рабочих со стройки. Однако далеко не всегда роботы создаются для замены человека.

The Rust Belt Robotics Group в университете Буффало, штат Нью-Йорк, разрабатывает человекоподобных роботов, чтобы помочь строительным бригадам, не заменяя их. Предполагается, что на стройке люди будут взаимодействовать с роботами, а сами роботы будут выполнять большую часть грязной работы (вывоз материалов, перенос грузов по лестницам, возведение лесов и др.). The Rust Belt Robotics Group построила три поколения малых роботов, все более и более сложных. Если робот первого поколения On-Site Construction Robot (OSCR) мог поднимать легкий, 3D-напечатанный кирпич, делать несколько шагов и опускать его в нужном месте, то робот третьего поколения перемещается на четырех ногах для большей устойчивости и прочности, переносит и устанавливает легкие, стандартного размера кирпичи. Он также может перемещаться и обрабатывать другие кирпичи, используя интегрированную видеокамеру и программное обеспечение для управления. В настоящее время компания строит свой четвертый прототип – двуногого робота,

который может использовать свои руки для захвата и резки блоков песчаника. Используя Wi-Fi, робот будет сочетать возможности предыдущих прототипов OSCR с возможностью 3D-сканирования окружающей среды и обмена информацией [18].

РОБОТЫ ДЛЯ ИНСПЕКЦИИ ТОННЕЛЕЙ

В настоящее время разрабатываются роботы нового поколения, которые будут обеспечивать полную автономность процесса инспекции. Этой цели служит программа ЕС ROBINSPECT. Сотрудники Мадридского университета в рамках этой программы разработали систему, состоящую из беспилотного транспортного средства и крана на нем, снабженного манипулятором с набором сенсоров. За один проход тоннеля робот с помощью системы компьютерного зрения будет делать мгновенные двумерные снимки каждого сантиметра стен. При обнаружении дефектов робот будет останавливаться и производить более детальную поверку стен тоннеля в указанном месте. На выполнение программы выделено 4,8 млн евро. Программа была рассчитана на 2013–2016 гг. Опытный образец робота предполагалось протестировать при строительстве метро в Лондоне и на трех других европейских объектах [19].

Подобные исследования ведутся в Канаде и США. В Канаде разработанная в Эдмонтонском университете роботизированная система Virtual Laser Target Board (VLTB) позволяет сканировать стены через каждые 200 м, не останавливая работу по проходке тоннеля, что экономит много времени и средств. Система уже прошла полугодовые испытания при строительстве канализационного тоннеля, и создатели намерены довести ее до коммерческого использования.

В США для инспекции атомных реакторов разработан робот, сканирующий бетонные поверхности. Робот крепится на стене реактора и перебирается по ней. Его предполагается использовать также для инспекции плотин крупных рек. Коммерческая версия этого робота, как ожидалось, будет готова в 2016 г. [20].

СИСТЕМЫ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Компанией Daqri в 2014 г. разработана каска для промышленных рабочих Smart Helmet [21], которая позволяет работникам получить доступ к интеллектуальным данным во время работы. На базовом уровне шлем обеспечивает обратную связь, обмен информацией с другими работниками независимо от их местоположения, и многое другое. Дизайн Smart Helmet включает в себя два выдвижных дисплея, которые располагаются перед глазами пользователя так же, как Google Glass. Если дисплеи не нужны, они поднимаются вверх; каска оснащена защитным козырьком и четырьмя камерами, которые могут охватывать обзор в 360 градусов и способны идентифицировать опасности (например, приближающиеся сзади погрузчики), а также широким набором сенсоров, в том числе теплового видения, объемной камерой и инерционной системой измерения для отслеживания движения. Экраны обеспечивают видимость при любом освещении; каска позволяет передавать работникам фотографии, 3D-изображения, инструкции и другую информацию. Приложения для каски созданы на основе ОС Android, поэтому их можно использовать в других устройствах.

Цена современных систем дополненной реальности (AR) высока (от сотен тысяч до миллионов долларов), но они могут на 30–90% снизить количество ошибок и время сборки. По мнению исследователей, AR является эффективной технологией для строительства и промышленности в целом. В краткосрочном периоде, как считают эксперты, будут доминировать системы AR на планшетной основе. В долгосрочной перспективе, когда улучшится качество и снизятся затраты, системы AR могут стать такими же распространенными, как смартфоны. По оценке консалтинговой компании Grand View Research [22], рынок AR составлял в 2020 г. 17,67 млрд долл. и прогнозируется его рост до 340,16 млрд долл. в 2030 г. Однако Market Research Report [23] оценивает рынок дополненной реальности в 2020 г. в 14,7 млрд долл. и прогнозирует рост к 2026 г. всего до 88,4 млрд долл.

ЭКЗОСКЕЛЕТЫ ДЛЯ СТРОИТЕЛЕЙ

Использование экзоскелетов может помочь рабочим в перемещении материалов на строительной площадке. Несколько компаний ведут работы в этом направлении (см. табл. 1).

Daewoo Shipbuilding Marine Engineering, одна из крупнейших в мире судостроительных компаний, разрабатывает робототехнические экзоскелеты, которыми собирается оснастить всех своих рабочих. Пока разработаны прототипы, которые могут помочь подъему металлических грузов массой до 30 кг, но они имеют значительные ограничения по использованию (заряда аккумулятора экзоскелета хватает на 3 часа работы, им могут пользоваться рабочие ростом от 160 до 185 см). Масса экзоскелета составляет 28 кг, но за счет пластиковой конструкции он не мешает и не давит на работника. В перспективе компания собирается преодолеть все недостатки и увеличить массу поднимаемого груза до 100 кг [24].

Компания Panasonic создала экзоскелет для строителей и работников складских помещений. Этот экзоскелет, по словам разработчиков, весит всего 6 кг, но помогает перемещать грузы до 15 кг. Он активизирует свое действие, когда человек наклоняется за грузом. Включающийся двигатель помогает рабочему разогнуться, уменьшая нагрузку на спину. Зарядки аккумулятора хватает на 8 часов непрерывной работы. Стоимость экзоскелета оценивается примерно в 8 тыс. долл., запуск в продажу ожидался в сентябре 2015 г. [25].

Японская компания Cyberdyne Inc., давно работающая в области создания экзоскелетов для медицинских целей, разработала экзоскелет HAL for Labor Support массой 3,1 кг, который крепится к поясу рабочего и снижает на 40% нагрузку на позвоночник. Заряда аккумулятора хватает на 4 часа работы. В мае 2015 г. использование этого экзоскелета проходило в рамках тестирования, в июле 2015 г. он начал применяться строителями-монтажниками на крупных стройках почти повсеместно. Помимо снижения риска травм, экзоскелет позволяет продолжать трудиться на стройке и лицам пожилого возраста. Первыми экзоскелеты опробовали сотрудники международного аэропорта в Токио. Кроме того, партию экзоскелетов получили строительные фирмы во Франции, логистические центры и крупнейшие аэропорты Германии [26].

Компания Ekso Bionics, известная своими экзоскелетами для медицинских и военных целей [27], также начала выпускать экзоскелеты для строительных рабочих. По оценкам компании, мировая строительная отрасль ежегодно теряет около 60 млрд долл. из-за травмы спины у рабочих [28]. В начале 2016 г. компания выпустила свой первый

промышленный экзоскелет, демонстрирующий существенное преимущество его использования в строительстве. По оценкам, один такой экзоскелет стоит около 10 тыс. долл., но компания указывает на быструю окупаемость инвестиций [29].

Таблица 1

Экзоскелеты различных компаний для строительных рабочих

Компания-производитель	Cyberdyne Inc	Panasonic		Ekso Bionics	Daewoo Shipbuilding Marine Engineering
Название	HAL for Labor Support	ATOUN Model A	ATOUN Model Y	EksoVest	...
Страна	Япония	Япония		США	Южная Корея
Область применения	Логистика, строительство	Строительные и складские работы		Строительство, автомобильная промышленность	Судостроительная промышленность
Ограничение по росту работника, см	140–180	155–185	150–190	152–193	160–185
Ограничение по массе работника, кг	40–80	50–80		...	...
Масса, кг	3,1	7,4	4,4	4,3	28
Время работы, ч.	3	8	4	...	3
Масса поднимаемого груза, кг	...	15	10	2,2–6,8	30
Стоимость (оценка), тыс. Долл.	...	8,1	7	12	...
Дата продаж	июль 2015 г.	сентябрь 2015 г.	апрель 2018 г.	2018	сентябрь 2014 г.

Источник: авторская разработка по данным [24–28].

По оценкам компании Qualiket Research [30], мировой рынок экзоскелетов, оцениваемый в 2021 г. в 499 млн долл., к 2027 г. вырастет до 3,34 млрд долл. Большую часть продаж составят медицинские ортопедические приложения, однако будет расти и доля экзоскелетов, применяемых в строительстве.

НОВЕЙШИЕ ВИДЫ РОБОТОТЕХНИКИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Швейцарский национальный научный фонд открыл в Цюрихе лабораторию цифровых производств (Digital Fabrication lab), наиболее завершенным проектом лаборатории является автономный робот Fabricator – промышленная рука на мобильной платформе, которая может класть кирпичи; он полностью автономен, имеет 2D лазерный дальномер, с помощью которого может создать 3D-карту объекта, что позволяет ему определять свое местоположение и перемещаться по строительной площадке без дополнительной инфраструктуры, а также автономно адаптироваться к небольшим вариациям дизайна, когда это необходимо. Пока робот может работать только в лабораторной среде и при укладке стены ставит кирпичи без раствора. Однако эта проблема, по мнению исследователей, разрешима.

Другим проектом лаборатории является создание робота, способного при строительстве использовать материалы с непредсказуемой геометрией, например, щебень. Этот

проект сосредоточен на разработке передовых технологий трехмерного сканирования материалов и анализа данных в реальном времени, а также цифрового робота, который будет способен реагировать на такие нерегулярные материалы. В результате предполагается разработать инновационную и экологически безопасную систему возведения зданий без традиционных связующих материалов.

Третий проект лаборатории объединяет два отдельных компонента строительства – армирование и опалубку – в единый роботизированный процесс изготовления («ячеистая формовка»). В основе проекта – изготовление бетонной конструкции методом выдавливания с помощью системы цифрового управления. Этот метод в будущем позволит создавать нестандартные экологически чистые железобетонные конструкции, которые могут быть эффективно изготовлены непосредственно на строительной площадке. Этот проект лаборатории рассчитан на 2013–2016 гг., два предыдущих – на 2014–2018 гг. [31].

Роботы-«термиты» для строительства. Предполагается переход от автоматизированного процесса укладки кирпича к технологии работы роботов по принципу термитов [32]. Такие роботы будут незаменимы для подводных исследовательских станций или в космическом пространстве. Кроме того, они могли бы применяться для строительства дамб из мешков с песком в зонах наводнения. Авторы разработки предложили многоагентную строительную систему, в основе которой лежит принцип строительства курганов термитами. Пользователь задает требуемую структуру объекта, и система автоматически генерирует правила действия для независимых роботов. Роботы используют только местное зондирование и координируют свою деятельность с помощью общей среды.

Технология была продемонстрирована в виде физической реализации с участием трех автономных роботов. Каждый робот имеет размер около 12 см, они могут манипулировать кирпичами из вспененного пенополиуретана, размер которых почти вдвое превышает размер робота. Созданы алгоритмы, регулирующие поведение роботов в любых ситуациях. Строительство начинается с одного кирпича в определенном месте, роботы могут двигаться вперед, назад и поворачиваться на месте, они в состоянии подняться вверх или вниз на один шаг, равный высоте одного кирпича, и строить лестницы из кирпичей, чтобы подняться выше; роботы могут обнаружить кирпичи и других роботов, которые находятся в непосредственной близости от них, но не имеют сведений об общем размере структуры или действиях отдаленных роботов. С помощью системы распознавания образов, состоящей из семи инфракрасных датчиков, роботы могут обнаружить черные и белые узоры на кирпичах, что помогает их навигации. Децентрализованная строительная система из роботов легко адаптируется к потере участников (в случае их выхода из строя), как это происходит в природе с термитами. Далеко не все технические задачи решены, однако принцип данного исследования может быть применен с целью отправки роботов для строительства базы на Марсе [33].

Роботы-инспекторы мостовых сооружений. В Цюрихском инженерно-технологическом университете Швейцарии разрабатывается робот, который может осматривать обратную сторону мостов для обнаружения коррозии и других повреждений раньше, чем они будут видны, что повысит безопасность использования мостов и сократит затраты на их ремонт. В 2014 г. этот робот прошел успешные испытания. В основу разработки был положен робот Paraswift, который первоначально был оснащен камерой и предназначен для

индустрии развлечений. При создании робота была использована технология электродного колеса для обнаружения областей низких электрических потенциалов в железобетоне, которые указывают на области с коррозией [34].

Мини-роботы – сварщики. Компания Hyundai Heavy Industries (HHI), одна из крупнейших судостроительных компаний в мире и ведущий производитель промышленных роботов, разработала мини-сварочные роботы для строительства кораблей. Они имеют компактную конструкцию (50x30x15 см) и могут работать в стесненных условиях, недоступных для сварщиков. Конечности с 6 степенями свободы позволяют роботу выполнять почти все виды сварочных работ на скорости, с которой, как правило, работают сварщики, использующие сварочный аппарат. С помощью магнита на теле робота его можно прикрепить к стальной стене или к потолку. Масса робота 15 кг, один оператор может контролировать трех роботов, что втрое увеличивает производительность. Компания планирует в дальнейшем разработку роботов для строительства береговых и морских объектов и строительного оборудования [35].

Роботы-краны. Компания Google планирует при постройке своего кампуса Googleplex, рассчитанного на 20 тыс. сотрудников, использовать роботы-краны («crabots»), представляющие собой набор малых гибких управляемых кранов и машин-роботов, сочетающих в себе маневренных мобильных роботов и традиционные подъемные краны грузоподъемностью до 10 т [36].

Робот-строитель мостов. В Нидерландах разрабатывается многоосная роботизированная рука, которая может строить 3D-металлические структуры. В 2014 г. компания MX3D разработала промышленного робота с уникальной сварочной машиной и программным обеспечением для его управления. Он может печатать 3D крупные сложные структуры из устойчивого материала (металлов, смолы) практически любого размера или формы. Два таких робота планировалось использовать для строительства моста в Амстердаме в 2017 г. Начав строить мост с двух разных сторон, роботы должны сойтись вместе в его центре, полностью автоматизированное строительство займет 2 месяца. Проект предполагает сотрудничество между MX3D, разработчиком программного обеспечения компанией Autodesk, строительной компанией Heijmans и др. [37]. В 2021 г. этот проект был реализован: открыт 12-метровый пешеходный мост из нержавеющей стали через один из каналов Амстердама в старом центре города, который был напечатан компанией MX3D.

Использование БПЛА в строительстве. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) помогает быстро осмотреть участки, получить представление о процессе строительства и принять верное решение. Снимок строительной площадки с видео высокого разрешения может также служить в качестве отчета о выполненных работах. Создание 3D-образа объекта по данным БПЛА поможет оценить выполнение предполагаемого графика работ.

В Японии ведущая компания по производству строительной техники Komatsu заявила о запуске нового сервиса под названием Smart Construction, целью которого является расширение использования информационных и коммуникационных технологий в строительстве и привлечение молодежи в эту отрасль. Сервис включает в себя платформу под названием KomConnect, которая будет подключать машины и рабочих к облаку, для повышения эффективности работ, оказывать помощь путем применения искусственного интеллекта при

контроле за работающей техникой, а также использование беспилотных летательных аппаратов. Smart Construction будет обеспечивать высокую точность обследования участков строительства, создавать 3D рисунок завершеного объекта, разрабатывать планы строительства, хранить все данные об объекте после завершения строительства. Накопленные данные также могут быть использованы для поддержания социальной инфраструктуры, а также для работ по реконструкции и в случае стихийных бедствий [36]. В системе Smart Construction будут использованы беспилотники компании Skycatch для проведения обследований и создания 3D-моделей, а также интерактивных карт участков строительства [38].

Компания Siemens в течение трех лет использовала беспилотные летательные аппараты для проведения работ над проектом Aspern Vienna's Urban Lakeside в Австрии – одном из крупнейших проектов городского развития в Европе. В 2014 г. компания представила пилотный проект, в котором данные воздушной съемки, сделанные БПЛА, сочетаются с программным обеспечением обработки изображений для визуализации потери энергии. Кроме того, данные могут быть представлены в виде тепловых карт, что облегчает определение зданий, ремонт которых позволит сделать их более энергоэффективными. С этой целью используются беспилотники с 8 пропеллерами, весом менее 5 кг. Операторы постоянно поддерживают визуальный контакт с беспилотниками и могут вмешаться, если возникают проблемы [39].

Австралийская фирма Soto Consulting Engineers использует БПЛА для контроля объектов тяжелой промышленности и рудников, крупных бетонных конструкций, котлов и горизонтальных конвейеров, а также для выявления структурных проблем в труднодоступных местах. Камеры высокого разрешения, установленные на БПЛА, позволяют определить места коррозии, что ведет к экономии средств и повышению безопасности объектов.

Применение беспилотников в строительстве не ограничивается только воздушной съемкой или инспектированием инженерной инфраструктуры. В 2011 г. Institute for Dynamic Systems and Control (Цюрих) представил 6-метровую башню, сложенную беспилотниками из 1500 кирпичей из полистирола. В настоящее время продолжается работа над проектом, особое внимание уделяя повышению грузоподъемности БПЛА.

Воздушные роботы могут быть оснащены различными инструментами для транспортировки материалов и манипулирования ими, что позволяет создать легкие строительные системы (например, тентовые конструкции, кабельные сетевые структуры и др.). Кроме того, БПЛА имеют уникальный набор атрибутов, который отличает их от обычной строительной техники: они обладают возможностью работать в труднодоступных местах, имеют способность взаимодействовать в структурах, которые не могут быть построены одной машиной и т.д.

В 2012 г. в Пенсильванском университете робототехники был представлен флот летающих роботов, образующих формирования в виде квадратов, восьмерок и др., что позволяет повысить грузоподъемность дронов без увеличения их размеров.

По мнению экспертов, на развитие технологий с использованием БПЛА для возведения сооружений может потребоваться от 5 до 10 лет, но даже тогда они будут только дополнять строительное производство, но не заменять его полностью. Другое возможное приложение создаваемых технологий – использование их на других планетах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Строительные роботы пока не стали повсеместно распространенным явлением. Однако развитие и совершенствование технологий, создание нового поколения сенсоров, новых систем навигации и перемещения, разработка приложений для эффективного взаимодействия между роботами открывает новые перспективы для развития строительных роботов. Уже в ближайшем будущем ожидается распространение строительной робототехники в широких масштабах. В настоящее время можно наблюдать, что технологии автоматизации строительства, обслуживание роботизированными системами и другие передовые технологии используются при сооружении зданий, строительных конструкций и строительной мебели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Developing the construction industry for employment-intensive infrastructure investments. URL: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_emp/---emp_policy/---invest/documents/publication/wcms_734235.pdf (дата обращения: 21.12.2021).
2. Global Construction Market Expected to Reach \$16.6 Trillion by 2025, Growing at a CAGR of 7% – ResearchAndMarkets.com. URL: <https://www.businesswire.com/news/home/20210309005459/en/Global-Construction-Market-Expected-to-Reach-16.6-Trillion-by-2025-Growing-at-a-CAGR-of-7---ResearchAndMarkets.com> (дата обращения: 21.12.2021).
3. Jackson J.R. Robotics in the Construction Industry. – University of Florida, 1990.
4. Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity. URL: <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/Operations/Our%20Insights/Reinventing%20construction%20through%20a%20productivity%20revolution/MGI-Reinventing-construction-A-route-to-higher-productivity-Full-report.pdf> (дата обращения: 23.12.2021).
5. Should We Prepare for a Construction Boom Post-COVID-19? Foreseeing Construction Industry Changes in the Wake of the Virus. URL: <https://www.dronedeploy.com/blog/should-we-prepare-for-a-construction-boom-post-covid/> (дата обращения: 24.03.2021).
6. Should We Prepare for a Construction Boom Post-COVID-19? Foreseeing Construction Industry Changes in the Wake of the Virus. URL: <https://www.dronedeploy.com/blog/should-we-prepare-for-a-construction-boom-post-covid/> (дата обращения: 24.03.2021).
7. Варшавский А.Е., Кочеткова Е.В. Проблемы дефицита инженерно-технических кадров // Экономический анализ: теория и практика. 2015. 32(431). С. 2–16.
8. Комкина Т.А. Динамика показателей качества среднего образования // Анализ и моделирование экономических и социальных процессов / Математика. Компьютер. Образование: Сб. научн. Трудов (выпуск 20). № 2. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2013. С. 40–48.
9. World Robotics 2002–2014 – IFR. URL: <https://ifr.org/> (дата обращения: 06.09.2022).
10. Robots and Automated Machines in Construction. – IAARC, March, 1998.
11. ERO – Concrete Recycling Robot URL: <https://archello.com/project/ero-concrete-recycling-robot> (дата обращения: 23.12.2021).
12. U.S. Bureau of Labor Statistics. URL: <http://www.bls.gov/ooh/construction-and-extraction/brickmasons-blockmasons-and-stonemasons.htm> (дата обращения: 27.05.2022).
13. Construction Robotics. SAM. URL: <https://www.construction-robotics.com/sam-2/> (дата обращения: 23.12.2021).
14. Contour Crafting Corporation. URL: <https://www.contourcrafting.com/> (дата обращения: 23.12.2021).
15. Fastbric Robotics. Building a Revolution. – July 2015 Presentation. 28 p.
16. Building Enthusiasm for Construction Robotics. URL: <http://insideunmannedsystems.com/building-enthusiasm-for-construction-robotics/> (дата обращения: 23.12.2021).
17. Варшавский А.Е. Основные тенденции и показатели развития робототехники // «Концепции». ПИК ВИНТИ. Москва. №1(33). С.16-25.

18. Citation: Co-Robotics and Construction: OSCR 1-4 Prototypes. URL: http://www.architectmagazine.com/awards/r-d-awards/citation-co-robotics-and-construction-oscr-1-4-prototypes_o (дата обращения: 23.12.2021).
19. Robotic System with Intelligent Vision and Control for Tunnel Structural Inspection and Evaluation / Project reference: 611145 Funded under: FP7-ICT.
20. Тоннельное строительство: процесс автоматизируют роботы. URL: <https://rcmm.ru/tehnika-i-tehnologii/22114-tonnelnoe-stroitelstvo.-process-avtomatiziruyut-roboty.html> (дата обращения: 27.05.2022).
21. Носимый 4D шлем-компьютер DAQRI Smart Helmet URL: <http://www.mobipukka.ru/2014/09/22/nosimyj-4d-shlem-kompyuter-daqri-smart-helmet/> (дата обращения: 23.12.2021).
22. Grand View Research, Inc. Augmented Reality Market Size, Share & Trends Analysis Report by Component, By Display (HMD & Smart Glass, HUD, Handheld Devices), By Application, By Region, And Segment Forecasts, 2021 – 2028. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/augmented-reality-market> (дата обращения: 23.12.2021).
23. Augmented Reality Market with COVID-19 Impact Analysis, by Device Type (Head-mounted Display, Head-up Display), Offering (Hardware, Software), Application (Consumer, Commercial, Healthcare), Technology, and Geography – Global Forecast to 2026. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/augmented-reality-market-82758548.html> (дата обращения: 23.12.2021).
24. Robotic suit gives shipyard workers super strength. URL: https://www.newscientist.com/article/mg22329803.900-robotic-suit-gives-shipyard-workers-super-strength/#.U_x-irxdUZG (дата обращения: 23.12.2021).
25. Panasonic выпустит экзоскелеты для строителей и рабочих в сентябре. URL: <http://news.rambler.ru/world/30665864/> (дата обращения: 23.12.2021).
26. HAL LUMBAR Type for Labor Support URL: https://www.cyberdyne.jp/english/products/Lumbar_LaborSupport.html (дата обращения: 23.12.2021).
27. Комкина Т.А. Особенности и перспективы развития медицинской робототехники // «Концепции». ПИК ВИНТИ. Москва. № 1 (33). С. 26–33.
28. Ekso Lifts Your Construction Team. URL: <https://eksobionics.com/construction/> (дата обращения: 23.12.2021).
29. This Industrial Exoskeleton Helps Workers Carry Their Loads. URL: <http://www.fastcompany.com/3049042/tech-forecast/this-industrial-exoskeleton-helps-workers-carry-their-loads> (дата обращения: 23.12.2021).
30. Global Exoskeleton Market Worth USD 3,340 million by 2027: CAGR 46.2%: Qualiket Research. URL: <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2021/10/26/2320537/0/en/Global-Exoskeleton-Market-Worth-USD-3-340-million-by-2027-CAGR-46-2-Qualiket-Research.html> (дата обращения: 23.12.2021).
31. IEEE Spectrum. Robotic Construction Gets Fancy at ETH Zurich's Digital Fabrication Lab. URL: <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/robotic-construction-gets-fancy-at-eth-zurich-digital-fabrication-lab> (дата обращения: 23.12.2021).
32. Man vs. Machine: Robots in the Construction Industry. URL: <http://www.isqft.com/start/blog-robots-in-the-construction-industry/> (дата обращения: 23.12.2021).
33. How termite-inspired robots could build for us. URL: <http://edition.cnn.com/2014/02/13/tech/innovation/termite-robots-aaas/> (дата обращения: 23.12.2021).
34. American Society of Civil Engineering URL: [https://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000229](https://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000229) (дата обращения: 24.05.2022).
35. Hyundai Heavy Develops Mini Welding Robot for Shipbuilding. URL: <http://www.marinelink.com/news/develops-hyundai-welding354258.aspx> (дата обращения: 23.12.2021).
36. New Googleplex will be built by robots. URL: <https://archinect.com/news/article/126826379/new-googleplex-will-be-built-by-robots> (дата обращения: 23.12.2021).
37. MX3D. URL: <http://mx3d.com/projects/bridge/> (дата обращения: 23.05.2022).
38. How drones are poised to help build the cities of tomorrow. URL: <http://www.gizmag.com/drones-building-construction-industry/36306/> (дата обращения: 24.12.2021).
39. Siemens. URL: <https://new.siemens.com/global/en/markets/smart-campus/references/aspern-viennas-urban-lakeside.html> (дата обращения: 22.05.2022).

ГЛАВА 18.

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ АНТРОПОМОРФНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

ВВЕДЕНИЕ

В течение нескольких последних десятилетий развитие антропоморфных роботов проходило от разработки машин, схожих с человеком по внешним параметрам и особенностям движения (шагающие роботы), к разработке механизмов, в которых осуществляется попытка воспроизвести когнитивные способности, поведение и взаимодействие, характерные для человека. Современные исследования во многом сосредоточены на социальных аспектах антропоморфной робототехники.

В настоящее время антропоморфные роботы находят применение в различных видах деятельности: на производственных линиях (например, роботы ARMAR-6, TALOS [1]), в опасных или физически тяжелых условиях, например, при выполнении спасательных работ [2], в космосе [3, 4], в строительстве, а также в сельском хозяйстве, образовании и др. [5]. Одним из драйверов роста рынка антропоморфной робототехники является увеличение использования роботов в сфере услуг [6] (в розничной торговле, банковском секторе, гостиничном бизнесе и др.), связанное как с развитием социальной робототехники, так и с проблемой старения населения [7, 8]. Пандемия COVID-19 выявила потенциал антропоморфной робототехники в сфере здравоохранения [9, 10]: использование антропоморфных роботов позволило снизить количество контактов, уменьшив случаи заболевания медицинского персонала, обеспечить связь больных с членами их семей с помощью телеприсутствия, доставку медикаментов, дезинфекцию и стерилизацию общественных мест [11, 12].

Несмотря на открывающиеся перспективы применения антропоморфной робототехники, она по-прежнему остается дорогостоящей; этот фактор в сочетании с соображениями безопасности ограничивает возможности ее развития. Большинство разработанных антропоморфных роботов все еще могут быть использованы в ограниченном числе приложений. Считается, что развитие новых, в том числе конвергентных технологий, будет способствовать преодолению этих ограничений. При этом особо выделяется задача разработки коммерчески доступных роботов [13].

В данном разделе рассмотрены основные этапы развития антропоморфных роботов, проанализированы некоторые технико-экономические показатели, характеризующие их развитие, а также исследованы основные тенденции развития рынка и вероятные риски их внедрения.

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ АНТРОПОМОРФНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

Основные этапы развития антропоморфной робототехники можно связать с развитием технологий хождения (bipedal walking) и обеспечения динамической устойчивости робота, совершенствования навигации в пространстве, манипулирования объектами, развития технологий компьютерного зрения и распознавания образов, усложнения выполняемых роботами задач, исследований в области искусственного интеллекта и социального взаимодействия [14].

Начало разработки антропоморфных роботов относится к 1970-м гг., когда в Японии был разработан первый шагающий робот – Waseda Robot No. 1 (WABOT-1) [15]. В 1980-х гг. исследования были сосредоточены на разработке и использовании более совершенных датчиков, исследовании локомоции шагающих роботов, совершенствовании моторики манипуляторов и разработке искусственных мышц, использовании технологии параллельных вычислений, моделировании простых когнитивных функций и т.д. [16]. В числе достижений в разработке антропоморфных роботов: увеличение скорости ходьбы и времени работы, более точная навигация и предотвращение столкновений, телеуправление, увеличение грузоподъемности, продолжались разработки технологии динамической ходьбы для шагающих роботов. Среди роботов, в которых была реализована данная технология, – WL (Waseda Leg) и WABIAN.

В 1986 г. начались разработки первых прототипов антропоморфных роботов компании Honda, к 1990-м гг. некоторые роботы уже использовались в автоматизированных производственных средах, для выполнения задач в опасных для человека условиях [17]. Очередной вехой в развитии антропоморфной робототехники стал запуск проекта HRP (Humanoid Research Project) в Японии с участием Honda и других частных компаний. Результатом проекта, завершившегося в 2003 г. роботом HRP-2, стала линейка роботов HRP, а компания Honda продолжила разработки собственного робота ASIMO, представленного в 2000 г., модернизировав динамическое движение с помощью модели прогнозирующего управления на основе упрощенной линейной модели перевернутого маятника [16]. К настоящему времени в технологии передвижения антропоморфных роботов уже реализованы контроль устойчивости в вертикальном положении, оптимизация траекторий ходьбы. К основным технологиям относятся технологии точки нулевого момента (ZMP, Zero Moment Point), методы пассивного динамического управления (passive dynamics control), метод управления крутящим моментом (compliance torque-control) [17]. Исследования в области биомеханики человека и животных стимулировали развитие технологий естественного движения, имитирующего движения живых организмов, разработки роботов с биомиметическими протезами.

Тенденции развития антропоморфной робототехники можно проиллюстрировать на основе анализа развития технических характеристик шагающих роботовⁱⁱ проекта Humanoid Robot Project (HRP), а также роботов Honda. Условно были выделены несколько поколений (внутри каждой группы моделей сами производители выделяют подпоколения, которые характеризуются менее существенными изменениями):

- первое поколение – шагающие роботы, которые не были еще человекоподобными в строгом смысле, разработанные корпорацией Honda и японским Национальным институтом передовой науки и технологий (AIST) (серия E, 1986–1993гг.);
- второе поколение – первые экспериментальные модели антропоморфных роботов, Honda в сотрудничестве с AIST (серия P, 1993–2000 гг.);
- третье поколение – антропоморфные роботы, среди которых выделяются роботы HRP (с 1997 г. – по настоящее время, Kawada в сотрудничестве с AIST) и роботы ASIMO (с 2000 г. – по настоящее время, Honda).

ⁱⁱ Среди антропоморфных роботов можно также выделить колесных роботов (wheeled) и роботов, представленных только верхней частью туловища (torso).

Основной целью разработки роботов серии E являлось исследование и имитация человекоподобной ходьбы, и создание шагающего робота. Первые модели E серии представляли собой небольшой корпус и ноги, человекоподобного облика у них еще не было. Робот E0, пилотная разработка, был одним из первых шагающих роботов. Приоритетными направлениями разработки E1, E2, E3 были увеличение скорости передвижения шагающих роботов по плоской поверхности. В дальнейшем, для роботов E4, E5, E6 ставилась задача обеспечения более стабильной ходьбы, в том числе по наклонной поверхности. Возможность подниматься по лестнице была доступна для моделей, начиная с E3, а способность обходить препятствия появилась лишь у последней модели E6 в 1993 г. Характеристики роботов серии E приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики роботов серии E

Показатель	E0	E1	E2	E3	E4	E5	E6
Год	1986	1987	1989	1991	1991	1992	1993
Вес, кг	16,5	72	67,7	86	150	150	150
Высота, см	101,3	128,8	132	136,3	159,5	170	174,3
Скорость ходьбы, км/ч	NA	0,25	1,2	3	4,7	NA	NA
Число степеней свободы	6	12	12	12	12	12	12

Источник: авторская разработка по данным [18].

Результаты разработки шагающих роботов-ног получили развитие при создании первых поколений антропоморфных роботов (табл. 2). В дополнение к совершенствованию таких характеристик, как стабилизация положения тела в процессе ходьбы, были поставлены задачи, связанные с повышением точности и функциональности руки-манипулятора. Так, в модели P1 (продолжение E6) была реализована возможность захвата и переноса предметов, в моделях P2 и P3 внимание уделялось совершенствованию системы управления роботом с учетом внешней среды. Робот P4 стал прототипом для двух новых линий роботов – ASIMO корпорации Honda и линейки HRP корпорации Kawada Industries. Если на первых этапах основное внимание этих конкурирующих предприятий было сосредоточено на совершенствовании особенностей движения робота, имитации человеческих движений, увеличении скорости и маневренности перемещения робота, то впоследствии в фокусе исследователей чаще оказывались вопросы развития мелкой моторики рук, а также искусственного интеллекта и характеристик, необходимых для реализации человеко-машинного взаимодействия при автономности робота.

Таблица 2

Технические характеристики роботов серии P

Показатель	P1	P2	P3	P4
Год	1993	1996	1997	2000
Вес, кг	175	210	130	80
Высота, см	191,5	182	160	160
Скорость ходьбы, км/ч	NA	2	2	2
Число степеней свободы	30	30	28	34
Число степеней свободы руки (предплечье и кисть)	NA	8	NA	NA

Источник: авторская разработка по данным [18].

Исследования и разработки роботов ASIMO шли по следующим направлениям. В 1993–1997 гг. в фокусе исследователей и разработчиков стояли задачи обеспечения целенаправленного движения робота, реализации возможности подниматься и спускаться по ступеням, использования руки-манипулятора (толкание тележки, перенос предметов), отладка режима дистанционного управления и др. Робот ASIMO (2000 г.) имел такие функции, как адаптивное хождение (flexible walking, обеспечивавшееся за счет запатентованной технологии i-walk), распознавание голоса и звуков, изображений. Дальнейшие усовершенствования включали автономное передвижение (ASIMO (2002)), увеличение скорости бега до 6 км/ч при стабильности передвижения, возможность транспортировки объектов (в том числе доставки адресату), распознавание лиц людей (next-gen ASIMO (2004), next-gen new ASIMO ver.2 (2005)), кооперация с другими роботами ASIMO (next-gen new ASIMO ver.2 (2007)), развитие мелкой моторики руки (открывание бутылки с водой), возможность автономного поведения робота и взаимодействия с человеком (all-new ASIMO ver.3 (2011), last-gen ASIMO (2014)). Современные исследования еще более сосредоточены на совершенствовании искусственного интеллекта, обеспечении возможности использования робота в социальном взаимодействии [19] (табл. 3).

Таблица 3

Технические характеристики роботов ASIMO

Показатель	ASIMO	ASIMO	next-gen ASIMO	next-gen new ASIMO ver.2	next-gen new ASIMO ver.2	all-new ASIMO ver.3	last-gen ASIMO
Год	2000	2002	2004	2005	2007	2011	2014
Цена, долл.	аренда 150 тыс. долл. в год	аренда 150 тыс. долл. в год	NA	около 1 млн долл.	около 1 млн долл.	NA	около 3 млн долл.
Вес, кг	52	54	54	54	54	48	50
Высота, см	120	130	130	130	130	130	130
Скорость ходьбы, км/ч	1,6	1,6	2,5	2,7	2,7	2,7	2,7
Скорость бега, км/ч	нет	нет	3	6	6	7	9
Число степеней свободы	26	30	34	34	34	57	57
Число степеней свободы руки (предплечье и кисть)	6	6	9	9	9	20	20
Время автономной работы, мин	30	60	60	60	60	60	60

Источник: авторская разработка по данным [19].

Рассмотренные тенденции также сохраняются в развитии роботов HRP [20,21]. Так, характерными инновациями для роботов HRP-2 (HRP-2P (1998), HRP-2 Promet (2002)) были возможность автономного передвижения, обхождения препятствий, планирование траектории перемещения. Роботы HRP-3 (HRP-3P (2005), HRP-3 Promet МК-II2 (2007)) были наделены возможностью дистанционного управления, более совершенными руками-манипуляторами. У роботов HRP-4С (2009), HRP-4 (2010) присутствовали возможности распознавания образов и звуков, в том числе речи. Характерной чертой роботов HRP, начиная со второго поколения, является способность самостоятельно подниматься после падения. В то же

время ряд функций, реализованных в более ранних версиях (например, число степеней свободы руки у HRP), отсутствует у следующих (у HRP-4C, робота-андроида число степеней свободы руки равно 1, пальцы не дифференцированы). При этом в одном из последних роботов, HRP-4C, реализована технология воспроизведения человеческой мимики за счет искусственных мышц лица. Характеристики роботов HRP приведены в табл. 4.

Таблица 4

Технические характеристики роботов HRP

Показатель	HRP-1(S)	HRP-2P	HRP-2 Promet	HRP-3P	HRP-3 Promet МК-II2	HRP-4C	HRP-4
Год	1997	1998	2002	2005	2007	2009	2010
Цена, долл.	NA	NA	NA	NA	NA	200 тыс. долл.	300 тыс. долл.
Вес, кг	130	58	58	65	68	43	39
Высота, см	160	154	154	160	160	158	151
Скорость ходьбы, км/ч	2	2	2,5	2	2	NA	NA
Скорость бега, км/ч	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Число степеней свободы	28	30	30	36	42	42	34
Число степеней свободы руки (предплечье и кисть)	8	7	7	10	13	9	9
Время автономной работы, мин	25	NA	NA	60	120	20	NA

Источник: авторская разработка по данным [20].

Продуктивным периодом для антропоморфной робототехники оказались 2000–2016 гг., чему способствовали увеличение вычислительных мощностей и достижения в области параллельных вычислений, совершенствование датчиков и интерфейсов. Фактором, стимулировавшим международные исследования в области антропоморфной робототехники, стало использование общих платформ с открытым кодом (например, ROS, Gazebo, YARP, Choreonoid) [15]. К этому времени относится разработка таких роботов как WABIAN-2, TORO, Hubo, iCub и Talos, Atlas от Boston Dynamics, Humanoid для платформы открытой архитектуры (HOAP, версии 1–3) от Fujitsu, робот DRC-HUBO и KHR от Корейского передового института науки и техники (KAIST), REEM от PAL Robotics. Цель создания ряда антропоморфных роботов была связана с развитием когнитивных исследований, например, iCub (когнитивное развитие ребенка в онтогенезе), RoboThespian (эмоциональная робототехника) и др. Исследования взаимодействия человека и робота (HRI, human – robot interaction) также проводились как на полноразмерных, так и на антропоморфных роботах колесного типа или роботах с неподвижной верхней частью туловища (torso) – роботы Robovie, ARMAR-III, PR-2 и Pepper.

Среди актуальных задач развития антропоморфной робототехники на сегодняшний день исследователи выделяют создание совершенной мехатроники, максимально соответствующей анатомии человека (управляющий экзоскелет; подбор приводов, длин перемещения и углов поворота, обеспечивающих воспроизводство основных движений человека с типичными скоростями и амплитудами и т.д.); увеличение времени автономной работы; развитие сенсорной системы (усовершенствование технического зрения, слуха, обоняния); совершенствование автономности роботов на основе искусственного интеллекта [22].

Особое внимание направлено на этические, правовые и социальные проблемы взаимодействия роботов и людей [23]. Важнейшей сферой применения антропоморфных роботов остаются научные исследования, где антропоморфные роботы выступают средством моделирования и исследования для биомеханики и когнитивных наук [24].

Исследования в области когнитивной робототехники и человеко-машинного взаимодействия стимулировали направления развития искусственного интеллекта, связанные с распознаванием сигналов из окружающей среды (зрительных образов, речи, обработки другой сенсорной информации, полученной с помощью тактильных или силовых датчиков) [16]. В перспективе – совершенствование технологий восприятия (целостность восприятия, устойчивость к помехам, изменение поведения при контакте с другими объектами, в том числе развитие взаимодействия с людьми, поддержание визуального контакта и др.), взаимодействия с объектами и людьми (получение опытного знания; способность предугадывать результаты коммуникации и изменения в среде) и адаптации в изменяющихся условиях с тенденцией ко все большему увеличению автономности системы. Одной из особенностей антропоморфной робототехники нового поколения называют развитие систем мотивации, еще больше сближающих данную технику с людьми. Значительный прогресс в области искусственного интеллекта, по мнению экспертов, может обеспечить использование результатов когнитивных и нейрофизиологических исследований человека. Предварительные работы по моделированию ИНС, искусственной нервной системы (ИНС) [25, 26], подобной по функциям и поведению нервной системе человека, проводились в рамках проекта АРНЭ (Антропоморфный робот организации Новая ЭРА, 2001–2003 гг.).

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АНТРОПОМОРФНЫХ РОБОТОВ

Анализ изменения технико-экономических показателей антропоморфной робототехники был проведен на основе выборки из 25 моделей роботов, разработанных корпорациями Honda, Kawada и японским Национальным институтом передовой науки и технологий (AIST) в период 1986–2014 гг., и дополнен анализом расширенной выборки шагающих роботов, включавшей более 100 моделей, произведенных в Японии, Южной Корее, США, европейских странах, России и др. Аналогичный подход к прогнозированию технологических характеристик робототехники на основе моделирования отдельных показателей также, например, представлен в работе [27], где рассмотрены характеристики экзопротезов рук, и на основе их изменения оценены перспективы развития отдельных технических показателей.

Взаимосвязь веса, высоты и числа степеней свободы. На первых этапах разработки роботов (1980–1990 гг.) рост веса можно было объяснить ростом веса аккумуляторов и дополнительных приводов при увеличении степеней свободы. В дальнейшем, использование новых материалов и аккумуляторов позволило значительно снизить и стабилизировать вес на близком к целевому уровню. Существуют представления о некотором диапазоне оптимальных значений веса и высоты антропоморфных роботов исходя из соображений кинематики, а также эргономичности, практики взаимодействия с человеком. Высота робота должна быть удобной для человека (устанавливалась как некоторый оптимум для человеко-машинного взаимодействия, см. [28]), для полноразмерных роботов, таким образом, она

составляет 130–170 см, и может быть больше 180 см для роботов-спасателей. Параметр веса ограничен как соображениями компактности робота, так и его мобильности, скорости перемещения. Так, большинство современных моделей, в частности HRP и ASIMO, ограничиваются весом в интервале 40–60 кг, что примерно также соответствует человеческим нормам. Наблюдаемый рост веса одновременно с увеличением высоты робота (рис. 1) очевиден, что можно объяснить усложнением строения моделей со временем, добавлением дополнительных приводов, батарей и др. Параметры миниатюрных образовательных роботов дают нижнюю границу высоты и веса данного вида механизмов.

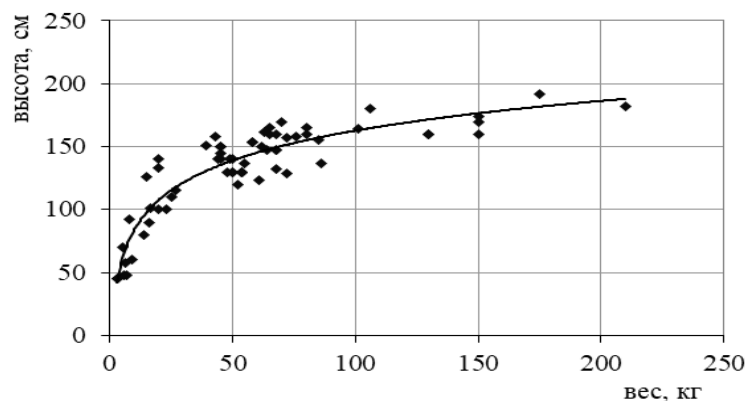


Рис. 1. Зависимость высоты и веса для расширенной выборки

Источник: авторская разработка по данным [18–20].

Одним из параметров, характеризующих совершенствование имитации человеческих движений роботом, является увеличение числа степеней свободы (рис. 2) как в целом, так и отдельно рук (почти у всех шагающих роботов изначально предусмотрено 6–7 степеней свободы ноги, что примерно соответствует аналогичному показателю для человека). Развитие роботов характеризуется тенденцией усложнения манипуляторов за счет добавления дополнительных приводов, что в итоге ведет к росту числа степеней свободы. В связи с развитием моторики руки, возможностей робота более точно манипулировать предметами возросло число степеней свободы рук роботов, в частности развивались двигательные характеристики кисти.

Согласно [29–31], существует взаимосвязь между размерами отдельных частей тела робота и количеством степеней свободы, обусловленная наличием некоторого предписанного расстояния (радиуса действия части конечности/корпуса) между отдельными сочленениями, расположением центров масс. Можно предполагать, что для хронологически более ранних моделей рост высоты с ростом числа степеней свободы происходил быстрее и общая высота роботов с максимальным числом степеней свободы в поколении была гораздо больше, чем для роботов последнего поколения, учитывая тенденцию к миниатюризации и компактизации как самих механизмов, так и их составных элементов. Соответственно, вес робота связан с весом как самих сочленений, так и величины отдельных частей корпуса робота. В каждом из рассматриваемых поколений присутствуют модели разной высоты (например, более низкие модели в первом поколении – первые шагающие «ноги» робота, во втором и третьем поколении – миниатюрные образовательные роботы, число степеней свободы которых велико настолько, чтобы они могли выполнять некоторые стандартные

функции). В то же время, одно и то же число степеней свободы может наблюдаться у роботов разной высоты при пропорциональном увеличении масштабов самих частей корпуса [32].

Число степеней свободы конечностей и головы относительно туловища человека оценивается приблизительно равным 105 [33]. В настоящее время этот уровень не достигнут почти ни в одном механизме (у робота Kotaro 91 степень свободы, однако это число отражает скорее число отдельных сочленений, в то время как у человека число суставов может превышать число степеней свободы [34]). Таким образом, можно отметить тенденцию к росту числа степеней свободы и в будущем до сопоставимого с человеческим. Согласно расчетам, на основе полученных экстраполяций, можно ожидать, что число степеней свободы шагающих роботов будет соответствовать количеству степеней свободы человека (около 90–100) примерно после 2050 гг. К этому же сходятся оценки, которые можно получить на основе линейной или логарифмической аппроксимации числа степеней свободы для расширенной выборки антропоморфных роботов (линейная зависимость для расширенной выборки представлена на рис. 3).

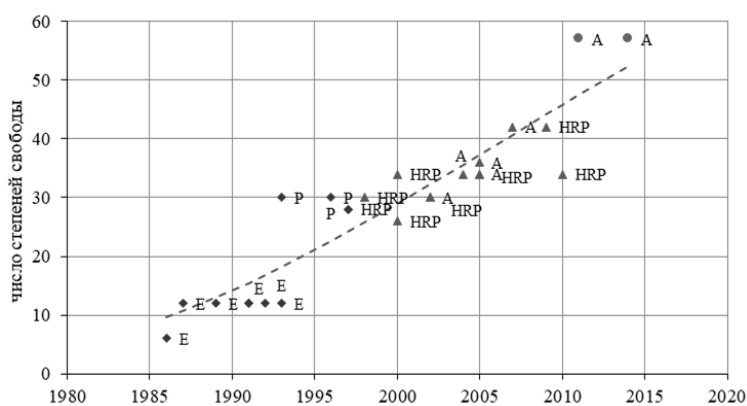


Рис. 2. Изменение числа степеней свободы антропоморфных роботов (E – серия E, P – серия P, HRP – роботы HRP, A – ASIMO)

Источник: авторская разработка по данным [18–20].

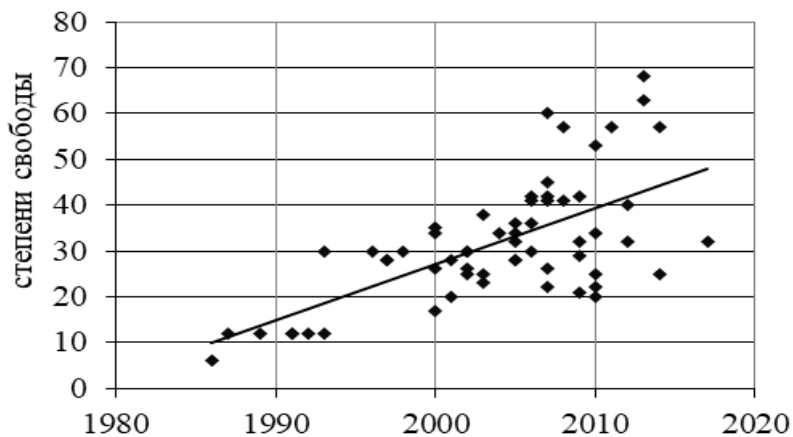


Рис. 3. Изменение числа степеней свободы антропоморфных роботов в зависимости от времени для расширенной выборки (по данным для 65 наблюдений)

Источник: авторская разработка по данным [18–20].

Анализ изменения внешних характеристик (вес, высота) и числа степеней свободы, проведенный на основе расширенной выборки, позволил условно выделить следующие поколения роботов:

- первое поколение (прототипы) – ранние модели роботов, характеризовавшиеся небольшой высотой, относительно высоким весом и низким числом степеней свободы, что объяснялось первоочередной необходимостью проведения исследований хождения на двух ногах, 1980–2000 гг.;
- второе поколение – наиболее распространённые модели роботов, включая подгруппу миниатюрных роботов, а также модели роботов, уже использующиеся в сервисе, в основу которых легли параметры поколения роботов 2000–2010 гг.;
- третье поколение (передовые модели) – исследовательские опытные образцы, превосходящие известные модели по параметрам, появившиеся после 2011 гг., как правило, характеризуются высоким числом степеней свободы, развитой рукой-манипулятором, появлением качественных характеристик, связанных с развитием искусственного интеллекта.

Результаты проведенного анализа свидетельствуют о взаимозависимости для таких показателей, как число степеней свободы, веса и высоты, произведения скорости передвижения и времени автономной работы, энергоэффективности. При этом рост числа степеней свободы и скорости передвижения роботов, вероятно, можно объяснить преобладавшей долгое время тенденцией исследования имитации человеческого движения и манипулирования предметами. В современных, наиболее технически сложных моделях (HRP-4, ASIMO last gen, REEM-C и др.) акцент постепенно смещается на качественные характеристики. Это может косвенно свидетельствовать о начале этапа насыщения в развитии чисто механических свойств антропоморфных роботов, замедлении роста ряда технических характеристик в пользу совершенствования интеллектуальных и социальных функций роботов, количественная оценка которых в настоящее время сопряжена с известными трудностями.

ПРОГНОЗЫ РАЗВИТИЯ АНТРОПОМОРФНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

В настоящее время разработка антропоморфной робототехники во многом характеризуется тенденцией перехода от исследований и разработок в области движения роботов (достижения стабильности, определенной скорости ходьбы, автономности движения, передвижения по неровной поверхности и в окружении других объектов) к совершенствованию качественных характеристик, в числе которых развитие искусственного интеллекта, социальное и эмоциональное взаимодействие, понимание естественного языка, способность к координации [34–36]. В ближайшей перспективе 2020-х гг., по мнению экспертов, развитие антропоморфной робототехники будет обусловлено во многом развитием компонентной базы, прежде всего, систем управления, включающих системы технического зрения, голосового управления и голосовых сообщений, тактильного восприятия, пространственной ориентации, управления походкой и устойчивостью, поведением (см., например, [23, 26]). Дальнейшая перспектива развития антропоморфных робототехнических систем связывается с увеличением автономности роботов.

В целом, по направлениям прогнозирования, можно выделить прогнозирование отдельных технических характеристик, связанных в большей степени с совершенствованием

компонентной базы (скорости передвижения, времени автономной работы), а также развитие качественных характеристик, в числе которых связанные с движением робота (автономность ходьбы, способность к точным манипуляциям, координация движений, мимика) и развитием «когнитивных» функций (понимание естественного языка, планирование и т.п.). В то же время, появление и перспектива развития технических характеристик антропоморфных роботов в значительной степени связаны с конкретной предполагаемой областью применения. Так, для исследовательской деятельности и социальных задач необходимо совершенствование когнитивных способностей робота, в то время как для использования роботов в военных операциях особую роль играют способности к адаптации и совершенные технические характеристики, которые делают роботов способными участвовать в боевых действиях [37].

Гораздо более велик разброс среди качественных характеристик роботов, связанных с развитием искусственного интеллекта, и, соответственно, более проблематичным оказывается прогнозирование «когнитивных» функций антропоморфных роботов. Общепризнанно, что в настоящее время они могут изображать и распознавать лишь ограниченный спектр эмоций, имитировать выражение эмоциональных реакций, участвуя в простых ситуациях, требующих эмоционального и социального взаимодействия, что оказывается достаточным для ряда выполняемых ими задач как сервисной робототехники [38, 39], однако сложные когнитивные функции им недоступны [40, 41]).

В работе [42] приведен прогноз развития технических характеристик антропоморфных роботов до 2050 г. Предполагается, что снижение веса с 50 кг до оптимального значения в 30 кг будет возможно благодаря снижению веса энергоблоков и датчиков в результате развития прорывных технологий в науках о материалах. При этом скорость ходьбы составит 5 км/ч к 2025 г., что соответствует нормальной скорости ходьбы взрослого человека. Возможно, максимального значения в 10 км/ч, выход за пределы которого в рамках ходьбы невозможен в связи с физическими ограничениями, она достигнет к 2050 г., максимальное время автономной работы к 2050 г. будет около 3 дней. По оценкам экспертов [43], возможности социального взаимодействия будут реализованы уже к 2025 г. Появление антропоморфных роботов с возможностями, превосходящими человеческие, предполагается к 2050 г. (табл. 6). Тем не менее, следует отметить наличие передовых разработок, существенно обгоняющих общий тренд и обогнавших по времени появления прогнозы. Так, например, в ряде моделей ASIMO уже реализован переход от статической ходьбы к динамически регулируемому хождению на двух ногах (dynamic bipedal walking) и бегу (по прогнозу EURON – к 2025 г. [40]), осуществлена координация движений и речи (ASIMO, Pepper и др., робот-Пушкин), продолжается эксплуатация роботов на МКС в качестве ассистентов космонавтов (FEDOR).

Очевидно, в ряде случаев, развитие технических характеристик может опережать прогнозы. Вероятными точками роста для более совершенной компонентной базы могут являться развитие нано- и биотехнологий, что будет способствовать значительному снижению энергопотребления, а также в дальнейшем появлению роботов, обладающих способностями, превосходящими человеческие. Однако, невзирая на то, что прогресс в смежных областях науки и технологий во многом определяет развитие робототехники в целом, конкурентоспособность конкретных моделей и успешная коммерциализация в значительной степени

зависят от эксплуатационной эффективности. Рынок предъявляет требования к многофункциональности: например, современные модели HRP, Walker и Honda E2-DR могут быть использованы как для строительства и сборки, так и для бытового использования и реагирования на стихийные бедствия [1].

Таблица 6

Развитие качественных характеристик антропоморфных роботов до 2100 г.

Период	Механические характеристики	Развитие искусственного интеллекта
К 2025 г.	переход от статической ходьбы к динамически регулируемому хождению на двух ногах (dynamic bipedal walking) и бегу, координация движений и речи	<ul style="list-style-type: none"> от знания роботом отдельных слов и интерпретации отдельных команд до владения естественным языком; способность обучаться социально-значимым действиям, отследить взаимосвязь между действиями и высказываниями, разнесенными во времени; использование в процессе коммуникации интонаций, мотивационных конструкций, учет межличностных взаимодействий и особенности конкретной ситуации; умение выстраивать цепочку действий для достижения конкретной цели
К 2030–2040	роботы-солдаты смогут выполнять в полной мере те же функции, что и люди в большинстве типов военных операций [44]	<ul style="list-style-type: none"> запоминание и воспроизведение обширного репертуара действий, описанного в ходе диалога на естественном языке или обусловленного социальным контекстом; способность к коммуникации на естественном языке, с учетом особенностей конкретной ситуации
К 2050 г.	полностью автономное перемещение; сложные манипуляции с помощью кисти и пальцев; непрерывная автономная работа в течение 24 часов	<ul style="list-style-type: none"> ориентация в окружающей обстановке в неструктурированных условиях; развитие понимания мотивов человеческого поведения и намерений, контекста ситуации, появление роботов, способных к обучению в процессе социального взаимодействия; планирование поведения и отдельных шагов для достижения цели, сложное социальное поведение
2050–2100 гг.	более совершенные механизмы, по характеристикам превосходящие человека [43]	<ul style="list-style-type: none"> переход от интерпретации отдельных команд к сильному ИИ, сравнимому с человеческим

Источник: авторская разработка по данным [43–45].

РЫНОК АНТРОПОМОРФНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

Антропоморфные роботы разрабатываются в лабораториях и исследовательских подразделениях компаний во многих странах (США, Канада, Великобритания, Япония, Германия, Франция, Россия, Китай, Южная Корея, Сингапур, Испания, Таиланд, Вьетнам, Турция, Мексика и др.) [44]. Результаты библиометрического анализа, проведенного в [13], показали, что за 2006–2017 гг. лидерами по числу патентов и публикаций по антропоморфной робототехнике являются США, Япония, Южная Корея, Франция, Германия. Похожие результаты могут быть получены по данным WIPO [45], где за период 2013–2022 гг. на долю указанных стран приходилось более 60% зарегистрированных патентов.

Значительная часть разработок сконцентрирована в сфере НИОКР и имеет ограниченный выход на рынок. Среди ключевых участников рынка антропоморфной робототехники можно отметить Qihan Technology, Softbank Robotics, Robotis, Ubtech Robotics Inc., DST Robot, Bluefrog Robotics, Engineered Arts, Trossen Robotics, Kawada, Hanson Robotics, Honda, Toshiba.

Неоднородность технических и качественных характеристик, определяющих сложность устройства, присутствующих одновременно на рынке антропоморфных роботов, во многом объясняет значительный разброс цен на отдельные модели. Например, цена программируемых роботов, предназначенных для обучения, составляет около 12 тыс. долл. (в их числе DARwIn, NAO), а стоимость роботов для образовательных целей и развлечения (например, RoboThespian, роботы компании Нейроботикс, Wakamaru и др.) варьируется от 3 тыс. до 100 тыс. долл. Сервисные роботы представлены несколькими моделями разной ценовой категории: от менее 10 тыс. долл. (Pepper, Wakamaru и некоторые другие) до более 1 млн долл. (например, ASIMO, Atlas), из которых находящиеся на этапе НИОКР и/или используемые в исследовательских целях, обладают наиболее высокой сложностью и, соответственно, ценой.

По оценкам экспертов, объем рынка антропоморфных роботов в 2016 г. оценивался в 450 млн долл., в 2017–2024 гг. прогнозировался рост со среднегодовым темпом, превышающим 35% (сегмент колесных антропоморфных роботов будет расти за период 2017–2024 гг. с темпом около 35%, а шагающих – со среднегодовым темпом более 30% [47]), в результате чего к 2024 г. объем рынка антропоморфных роботов может достигнуть 5,5 млрд долл. [41]. Ожидается, что к 2024 г. мировые поставки достигнут 1 млн ед., увеличившись на 40% по сравнению с базисным годом [10, 48].

Стимулом внедрения антропоморфной робототехники в отраслях промышленности, логистике, строительстве является развитие промышленного интернета вещей (IIoT) и индустрии 4.0, а также появление более строгих стандартов безопасности и качества, создающих потребность в разработке систем для предупреждения и ликвидации аварий на производстве и чрезвычайных ситуаций [49]. Препятствием развитию рынка антропоморфной робототехники может стать необходимость значительных инвестиций в исследования и разработки, зависимость от развития смежных технологий, высокая стоимость роботов, на которую в значительной степени влияет рост цен на отдельные комплектующие и компоненты робототехники, что ограничивает возможности внедрения антропоморфных роботов на малых и средних предприятиях и в компаниях с низкими инвестиционными возможностями. При этом отрасль антропоморфных роботов в настоящее время характеризуется достаточно напряженной конкуренцией среди игроков наряду со сложностью расширения спроса на уникальную в своем роде продукцию. Например, компания Rethink Robotics, первая представившая миру коммерчески доступных коллаборативных роботов (Baxter, Sawyer) в 2018 г., ушла с рынка и завершила разработки, фактически будучи вытесненной конкурентами, в том числе в лице флагманов индустрии промышленных роботов [50].

Экспертами отмечается, что рост функциональности антропоморфной робототехники происходит со значительным запаздыванием относительно роста стоимости разработки наиболее сложных механизмов. Во многом это снижает интерес инвесторов к разработке антропоморфных роботов в пользу более легко коммерциализируемых

механизмов [51]. Отсутствие рыночного спроса заставляет компании и инвесторов пересматривать целесообразность своих инвестиций и при этом для инвесторов, ищущих сокращение сроков окупаемости вложений, оказывается более интересным вкладывать в развитие технологий искусственного интеллекта и программного обеспечения, чем аппаратной части антропоморфных роботов, что также сказывается на развитии технологий и рынка в целом. Так, в середине 2010-х гг. ряд компаний заявляли о прекращении разработок антропоморфных роботов, что было обусловлено сокращением бюджетов на НИОКР и переориентацией на более прагматичные цели и технологии, а также ростом конкуренции среди производителей. В 2018 г. объявила о прекращении разработок робота Asimo компания Honda. Упомянулось, что разработка антропоморфных роботов была способом поиска и тестирования технологических возможностей, которые планируется применить в роботизированном наземном транспорте, включая самобалансирующие мотоциклы, и на роботах-сиделках медицинского назначения (в частности роботов для помощи пациентам, восстанавливающим функции двигательного аппарата) [52, 53]. В том же году объявила о закрытии Mayfield Robotics, представившая социального робота Kuri, по причине стабильно низкого спроса на этот продукт [49].

РИСКИ, СВЯЗАННЫЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ АНТРОПОМОРФНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

Возможности автоматизации определенных профессий тесно связаны как с альтернативной стоимостью затраченного труда, так и с возможностью воспроизведения роботами компетенций, ожидаемых от работников. Эти факторы объясняют сложность автоматизации многих профессий, в первую очередь, сферы услуг, для которой характерно непосредственное взаимодействие с человеком. Согласно мнению экспертов, вероятность вытеснения работников антропоморфными роботами весьма невелика, даже несмотря на существование значительной доли профессий, подверженных исчезновению в связи с автоматизацией [54–56]. Несмотря на пессимистичные ожидания, что большинство низкоквалифицированных и низкооплачиваемых рабочих мест будут автоматизированы в ближайшем будущем [43, 57], предполагается более вероятным, что интеллектуальные роботы, к которым относятся антропоморфные, и люди будут взаимно дополнять друг друга, поскольку роботы будут использоваться для автоматизации рутинных задач и физически тяжелых или опасных работ, предоставляя людям больше возможностей для занятия творческими и социально-ориентированными задачами [58, 59]. Текущий уровень развития искусственного интеллекта позволяет антропоморфным роботам выполнять ограниченный набор функций, ориентироваться во вполне предопределенных ситуациях и обстоятельствах, благодаря чему становится возможной роль ассистентов человека, однако все еще ставится под сомнение полная автономность в выполнении задач. Остается нерешенным вопрос, когда и в какой степени решение может принимать машина на основе встроенных алгоритмов, и когда – человек (см. [60–62]), поскольку при отсутствии полной информации о процедуре обучения робота и усвоенных им шаблонах, поведение робота в неконтролируемых средах может быть близко к непредсказуемому (см., например, [63]). Таким образом, наиболее вероятным является сценарий, когда развитие технологий приведет к существенным

изменениям рынка труда за счет появления новых профессий, создания новых рабочих мест и появления совершенно новых экосистем занятости [64].

Помимо проблемы вытеснения труда, возникает ряд проблем, свойственных развитию цифровых технологий: правового характера, информационной безопасности, а также проблем человеко-машинного взаимодействия. Причиной искажения восприятия антропоморфных роботов может быть свойственное человеку стремление присваивать человеческие качества неодушевленным предметам [65–68]. Так, существуют риски приписывания способности испытывать настоящие эмоции вследствие возможности мимического отражения запрограммированных эмоций роботом [69], возникновения неоправданных ожиданий в отношении соответствия поведения робота нормам морали, способности принимать решения, которые не применимы к механическому устройству [70, 71]. Обратной стороной искажения восприятия антропоморфных роботов может обернуться риск десоциализации и дегуманизации отношений между людьми, совмещение образа человека и человекоподобной машины в сознании людей, снижение ценности личности и человеческой жизни [71].

Создателями антропоморфных роботов предполагается, что прогресс в их разработке во многом связан со стремлением человека окружить себя все более похожими на человека механизмами, взаимодействие с которыми будет для человека более комфортным [71]. Это, однако, часто не подтверждается в ситуации реального человеко-машинного взаимодействия. Например, в [72] описан результат исследования, выявившего, что в чрезвычайных ситуациях люди чувствовали большую защищенность, когда робот-спасатель был не антропоморфным, предпочитая человекоподобной пластике более предсказуемые резкие механические движения. Ряд исследований свидетельствуют о том, что люди чувствуют себя в большей степени некомфортно при контакте с антропоморфными роботами, сходство с человеком которых слишком близко. Так, концепция зловещей долины (*uncanny valley*) [69] предполагает существование нелинейной связи между степенью сходства робота с человеком (внешности, мимики, жестов) и степенью симпатии, испытываемой человеком к роботу: сначала, с ростом антропоморфности, человеческая симпатия к роботу увеличивается, однако существует некоторый порог восприятия, за которым робот, обладающий высокой степенью сходства с человеком, вызывает сильные негативные эмоции (примерами таких роботов могут быть CB2 Child Robot, андроид-манекен для обучения стоматологов Showa Hanako). Феномен «зловещей долины» связан со множеством факторов, способствующих возникновению чувства беспокойства и отвращения: неестественность внешнего вида антропоморфных роботов и черт лица, сходство антропоморфных роботов с мертвыми людьми, отсутствие эмоций фальшивость, вероятность того, что неживой организм (антропоморфный робот) может обладать схожим с человеческим разумом и сознанием [73].

Одной из центральных проблем взаимодействия с антропоморфной робототехникой является проблема доверия [74]. Люди склонны переоценивать возможности и способности роботов, что ведет в целом к неадекватному восприятию и, как следствие, взаимодействию, а также может выражаться в отрицании взаимодействия при отсутствии доверия или, наоборот, избыточном доверии к робототехнике [75–77], когда человек считает, что использование робота значительно снизит риск или позволит полностью его избежать. Особую опасность такие ошибки восприятия представляют при использовании робототехники в сфере здравоохранения и при ликвидации чрезвычайных ситуаций. Расширение сферы

взаимодействия робота и человека все более актуализирует проблему манипуляции (например, этические вопросы, возникшие при разработке и использовании робота-психотерапевта ELIZA [78]). По прогнозам экспертов, сфера воздействия искусственного интеллекта на человека будет расширяться, включая области рекламы, заключения сделок и др. [73]. При этом сценарий манипуляции может быть предусмотрен самими разработчиками робота (например, для управления потребительским поведением) и подкреплен эмоциональным взаимодействием и антропоморфной внешностью робота [79, 80].

Возможность реализации негативных сценариев, включающих нанесение вреда человеку, требует рассмотрения вопроса ответственности за результат действий робота, которая не может быть ему вменена. Открытым остается вопрос о рисках применения антропоморфных роботов для общества в целом, связанный с невозможностью прогнозировать поведение роботов в неконтролируемой среде, в том числе в многообразных социальных ситуациях, и ответное поведение людей, социальных групп и социальных систем [71]. Негативные прогнозы касаются возникновения эмоциональной привязанности и последующей зависимости от роботов, проблем эмоционального общения и восприятия, коммуникации, восприятия роботов детьми [81], стирания границ между реальностью и виртуальностью, возникновения ситуации, когда задолго до обретения роботами человекоподобного сознания или интеллекта они будут использоваться в противоправных и преступных действиях против людей.

Считается, что ответственность должна быть распределена между исследователями, разработчиками, производителями и лицами, контролирующими деятельность машины в реальном времени. В большинстве случаев основную ответственность за работу антропоморфного робота возлагают на инженеров-робототехников, принимавших непосредственное участие в разработке системы [72]. В связи с этим международными организациями разработаны кодексы этики инженеров (например, American Society of Mechanical Engineers (ASME) Code of Ethics [82], Association for Computing Machinery (ACM) Code of Ethics [83] и др.). Существует также проблема адекватности поведения робота в социальной среде, так как понятия и стандарты нормы реагирования, морали, ответственности в области робототехники до сих пор остаются неясными и неопределенными. Это требует более тщательного предварительного контроля восприятия человекоподобных систем, понимания их возможностей и последствий социального взаимодействия. Рекомендации по предотвращению негативных ситуаций сводятся, прежде всего, к разработке стандартов обучения роботов, этическому контролю за исследованиями, направленными на развитие искусственного интеллекта и формирование поведения роботов, формированию стандартов оценки социального поведения роботов и его коррекции, а также стандартов безопасности при эксплуатации робототехники. Необходимо также уделять внимание вопросам информационной безопасности и аутентификации при удаленном управлении робототехникой. Отмечается необходимость закладывания кросс-культурных стандартов и ценностей при развитии социальной робототехники (см. [66, 84, 85]). Тем не менее, даже при возможности разработки принципов этичного поведения для робота, остается вопрос, кто и каким образом будет определять набор этих принципов и разрабатывать схему распознавания ситуаций их применения, а также каковым будет поведение робота в ситуации морального выбора, с которым неизбежно приходится сталкиваться в рамках социального взаимодействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Этапы развития антропоморфной робототехники объединены тенденцией перехода от совершенствования технических характеристик, связанных в большей степени с развитием компонентной базы, к разработке механизмов, в которых осуществляется попытка воспроизвести интеллект, поведение, эмоциональное и социальное взаимодействие, и при этом позволяющее обеспечить роботам многофункциональность. Дальнейшая перспектива развития антропоморфных робототехнических систем связывается с увеличением автономности. При этом возможно прогнозирование отдельных технических характеристик, в то время как прогнозы развития качественных характеристик, в основном, базируются на экспертных оценках. Результаты проведенного анализа технико-экономических показателей развития антропоморфных роботов позволили получить предварительные оценки, свидетельствующие о возможности достижения числа степеней свободы, близкого к человеческому, в 2050–2100 гг., что также согласуется с приведенными оценками экспертов.

В то же время, необходимо учитывать, что разработка сложных антропоморфных систем может привести к целому спектру негативных последствий для человека, а также к росту рисков для общества в целом. Таким образом, целесообразным является продолжение исследований психологических и социальных аспектов взаимодействия человека и робота, повышение осведомленности общества о возможных рисках, целях и функциях разрабатываемых антропоморфных роботов для формирования адекватного восприятия антропоморфной робототехники; повышение квалификации и подготовка специалистов, взаимодействующих с антропоморфными роботами в процессе работы (на производственных предприятиях, в социальных учреждениях, при ликвидации чрезвычайных ситуаций и т.д.); разработка и соблюдение этических норм разработчиками антропоморфной робототехники, в особенности, предназначенной для социального взаимодействия с целью предотвращения возникновения других негативных эффектов; проведение длительного цикла испытаний образцов, как при разработке, так и в период эксплуатации в целях предупреждения возникновения ранее неизвестных рисков социального взаимодействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bogue R. (2020) Humanoid robots from the past to the present, *Industrial Robot*, Vol. 47 No. 4, pp. 465–472. <https://doi.org/10.1108/IR-05-2020-0088>.
2. Качанов С.А., Мошков В.Б., Баранник А.Ю., Якутов А.В. Адаптация технологий, реализуемых при создании антропоморфных роботов и робототехнических комплексов в интересах решения задач МЧС России // *Технологии гражданской безопасности*. 2016. № 4 (50). С. 14–18.
3. Белоножко П.П. Космическая робототехника. Современное состояние, перспективные задачи, тенденции развития. Аналитический обзор // *Наука и Образование*. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 12. С. 110–153.
4. Бурдин Б.В., Супотницкий А.Н. Исследование рисков создания и применения антропоморфных робототехнических систем космического назначения // *Пилотируемые полеты в космос*. 2014. № 4 (13). С. 68–87.
5. Atkinson R.D. Robotics and the Future of Production and Work // *Information technology and innovation foundation*, 2019. URL: <https://itif.org/publications/2019/10/15/robotics-and-future-production-and-work> (дата обращения: 26.05.2022).
6. Mende M, Scott ML, van Doorn J, Grewal D, Shanks I. Service Robots Rising: How Humanoid Robots Influence Service Experiences and Elicit Compensatory Consumer Responses. *Journal of Marketing Research*. 2019; 56(4):535-556. doi: 10.1177/0022243718822827.

7. Papadopoulos I, Koulouglioti C, Lazzarino R, et al. Enablers and barriers to the implementation of socially assistive humanoid robots in health and social care: a systematic review // *BMJ Open* 2020;10:e033096. doi: 10.1136/bmjopen-2019-033096.
8. Szkopek J, Redlarski G. Artificial-Hand Technology—Current State of Knowledge in Designing and Forecasting Changes. *Applied Sciences*. 2019; 9(19):4090. <https://doi.org/10.3390/app9194090>.
9. Cresswell, K.; Cunningham-Burley, S.; Sheikh, A. Health care robotics: Qualitative exploration of key challenges and future directions. *J. Med. Internet Res.* 2018, 20.
10. Humanoid Robot Market // *Global Market Insights*. URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/humanoid-robot-market> (дата обращения: 26.05.2022).
11. Zhanjing Zeng, Po-Ju Chen & Alan A. Lew (2020) From high-touch to high-tech: COVID-19 drives robotics adoption, *Tourism Geographies*, 22:3, 724-734, DOI: 10.1080/14616688.2020.1762118.
12. Ozturkcan, S., and Merdin-Uygur, E. (2021). Humanoid Service Robots: The Future of Healthcare? *Journal of Information Technology Teaching Cases*. <https://doi.org/10.1177/20438869211003905>.
13. Kumari R, Jeong JY, Lee B-H, Choi K-N, Choi K. Topic modelling and social network analysis of publications and patents in humanoid robot technology. *Journal of Information Science*. 2021; 47(5):658-676. doi:10.1177/0165551519887878.
14. Станкевич Л.А. Искусственный интеллект и искусственный разум в робототехнике: учеб. пособие / Л.А. Станкевич, Е. И. Юревич. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.
15. Yoshida E. Robots that look like humans: A brief look into humanoid robotics // *Mètode Science Studies Journal*, vol. 9, pp. 143–151, 2019. DOI: <https://doi.org/10.7203/metode.9.11405>
16. Solis J., Takanishi A. (2010) Recent Trends in Humanoid Robotics Research: Scientific Background, Applications, and Implications, *Accountability in Research*, 17:6, 278–298, DOI: 10.1080/08989621.2010.523673
17. Liu, G.H.Z., Chen, M.Z.Q. & Chen, Y. When joggers meet robots: the past, present, and future of research on humanoid robots. *Bio-des. Manuf.* 2, 108–118 (2019). <https://doi.org/10.1007/s42242-019-00038-7>
18. Honda Robotics History // URL: <https://global.honda/innovation/robotics/robot-development-history.html> (дата обращения: 12.08.2022).
19. Masato Hirose, Kenichi Ogawa. Honda humanoid robots' development // *Phil. Trans. R. Soc. A* (2007) 365, 11–19. doi:10.1098/rsta.2006.1917. Published online 17 November 2006.
20. Hirohisa Hirukawa et al. Humanoid robotics platforms developed in HRP // *Robotics and Autonomous Systems*. Volume 48, Issue 4, 31 October 2004, Pages 165-175. doi: 10.1016/j.robot.2004.07.007
21. Kajita S. et al. (2011) Cybernetic Human HRP-4C: A Humanoid Robot with Human-Like Proportions. In: Pradalier C., Siegwart R., Hirzinger G. (eds) *Robotics Research*. Springer Tracts in Advanced Robotics, vol 70. Springer, Berlin, Heidelberg.
22. Хурс С. П., Вере́йкин А. А. Состояние и тенденции развития антропоморфной робототехники // *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 04. С. 25–52.
23. Artificial Intelligence Index Report 2022 // URL: https://aiindex.stanford.edu/wp-content/uploads/2022/03/2022-AI-Index-Report_Master.pdf (дата обращения: 06.09.2022).
24. Siciliano B., Khatib O. Humanoid Robots: Historical Perspective, Overview and Scope / in book *Humanoid Robotics: A Reference* (pp.1-6). 2019. DOI:10.1007/978-94-007-7194-9_64-1
25. Разработка искусственной нервной системы гуманоидного робота (аватара) // URL: <http://www.2045.ru/experts/28869.html> (дата обращения: 25.05.2022).
26. Sheng Li, Hanbai Lyu, Yunlei Zhou, Hengyuan Wang, Jing Wu, Xingxun Gao, Jian Li, Qing Wan, Desheng Kong, Yi Shi, Lijia Pan, Artificial Reflex Arc: An Environment-Adaptive Neuromorphic Camouflage Device, *IEEE Electron Device Letters*, 42, 8, (1224-1227), (2021). <https://doi.org/10.1109/LED.2021.3090767>.
27. Chen-Yuan Liu, Jhen-Cheng Wang. Forecasting the development of the biped robot walking technique in Japan through S-curve model analysis *Scientometrics* (2010) 82:21–36. DOI 10.1007/s11192-009-0055-5. Published online: 12 June 2009.
28. Joseph T. Belter, Aaron M. Dollar. Performance Characteristics of Anthropomorphic Prosthetic Hands // 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics Rehab Week Zurich, ETH Zurich Science City, Switzerland, June 29 – July 1, 2011.
29. ASIMO. URL: <http://asimo.honda.com/downloads/pdf/asimo-technical-information.pdf>. (дата обращения: 26.05.2022).

30. Jung-Yup Kim, Ill-Woo Park and Jun-Ho Oh. Walking Control Algorithm of Biped Humanoid Robot on Uneven and Inclined Floor. URL: https://www.cs.cmu.edu/~cga/legs/Paper_3.pdf. (дата обращения: 12.08.2022).
31. Ill-Woo Park, Jung-Yup Kim, Seo-Wook Park, and Jun-Ho Oh. Development of Humanoid Robot Platform KHR-2 (KAIST Humanoid Robot – 2). URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.857.7094&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения: 12.08.2022).
32. de Torre S., Cabas L.M., Arbulu M., Balaguer C. Inverse dynamics of humanoid robot by balanced mass distribution method. 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566), Sendai, 2004, pp. 834-839 vol.1. Doi: 10.1109/IROS.2004.1389456.
33. Ahmed I Elhasairi. Humanoid Robot Full-Body Control & Balance Restoration // A thesis submitted in fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy. Surrey Space Centre Department of Electronic Engineering Faculty of Engineering & Physical Sciences University of Surrey Guildford, UK. June 2015. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/6c88/100aa8ab23459520ca0f2ad9035b17c44075.pdf> (дата обращения: 26.05.2022).
34. Замаараев, В. А. Анатомия для студентов физкультурных вузов и факультетов: учебник и практикум для академического бакалавриата / В. А. Замаараев, Е. З. Година, Д. Б. Никитюк. М.: Юрайт, 2019.
35. Humanoid Robot Market by Component, Motion Type, Application and Geography – Global Forecast to 2023. URL: <https://markets.businessinsider.com/news/stocks/humanoid-robot-market-by-component-motion-type-application-and-geography-global-forecast-to-2023-1007132016> (дата обращения: 27.05.2022).
36. A Roadmap for US Robotics: From Internet to Robotics. URL: <https://cra.org/ccc/wp-content/uploads/sites/2/2016/11/roadmap3-final-rs-1.pdf> (дата обращения: 26.05.2022).
37. Manyika, J., Chui, M., Miremadi, M., Bughin, J., George, K., Willmott, P. and Dewhurst, M. (2017), A Future that Works: Automation, Employment, and Productivity, McKinsey Global Institute. URL: www.mckinsey.com/global-themes/digital-disruption/harnessing-automation-for-a-future-that-works (дата обращения: 26.05.2022).
38. Technology assessment of autonomous intelligent bipedal and other legged robots. Final report. Contract Number MDA972-02-M-0025. Defense Advanced Research Projects Agency, Robotic Technology Inc., National Institute of Standards and Technology. November, 2004.
39. Wirtz J., Patterson P.G., Kunz W.H., Gruber T., Lu V.N., Paluch S. and Martins A. (2018) Brave new world: service robots in the frontline. *Journal of Service Management*, Vol. 29 No. 5, pp. 907-931. <https://doi.org/10.1108/JOSM-04-2018-0119>
40. Sato W, Namba S, Yang D, Nishida S, Ishi C and Minato T (2022) An Android for Emotional Interaction: Spatiotemporal Validation of Its Facial Expressions. *Front. Psychol.* 12:800657. doi: 10.3389/fpsyg.2021.800657
41. European Robotics Research Network, EURON (2004) Key Area 1 on «Research Coordination» – KA1. Robotics. Roadmapdiagram, s. 60. URL: <http://www.org.id.tue.nl/IFIP-SG16/robotics-roadmap-2004.pdf> (дата обращения: 27.05.2022).
42. Humanoid Robots Market Research by Product, Applications and Regions to 2024: Global Market Insights, Inc. // URL: <https://www.globenewswire.com/news-release/2020/01/09/1968157/0/en/Humanoid-Robots-Market-Research-by-Product-Applications-and-Regions-to-2024-Global-Market-Insights-Inc.html> (дата обращения: 25.05.2022).
43. Shuuji Kajita & Tomomichi Sugihara (2009) Humanoid Robots in the Future, *Advanced Robotics*, 23:11, 1527-1531, DOI: 10.1163/016918609X12469692711804.
44. Matamoros M., Harbusch K., Paulus D. From Commands to Goal-based Dialogs: A Roadmap to Achieve Natural Language Interaction in RoboCup@Home.
45. Cangelosi A., Metta G. Integration of Action and Language Knowledge: A Roadmap for Developmental Robotics. *IEEE Transactions on autonomous mental development*. Vol. 2, No. 3, September 2010.
46. Keisner A., Raffo J., Wunsch-Vincent S. (2016) Robotics: Breakthrough Technologies, Innovation, Intellectual Property. *Foresight and STI Governance*, vol. 10, no 2, pp. 7–27. DOI: 10.17323/1995-459X.2016.2.7.27
47. WIPO. URL: <https://patentscope.wipo.int> (дата обращения: 25.05.2022).
48. Humanoid Robot Market – Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, and Forecast 2017 – 2025. URL: <https://www.transparencymarketresearch.com/humanoid-robot-market.html> (дата обращения: 26.05.2022).

49. Humanoid Robot Market Size to exceed \$5.5bn by 2024 // URL: https://www.gminsights.com/press-release/humanoid-robot-market?utm_source=globenewswire.com&utm_medium=referral&utm_campaign=Paid_globenewswire (дата обращения: 27.05.2022).
50. The company behind the adorably doomed robot Kuri is shutting down // URL: <https://www.theverge.com/circuitbreaker/2018/8/21/17765330/mayfield-robotics-kuri-robot-shutting-down> (дата обращения: 27.05.2022).
51. Пионер коллаборативной робототехники Rethink Robotics уходит с рынка. URL: <http://robotrends.ru/pub/1840/pioneer-kollaborativnoy-robototekhniki-rethink-robotics-uhodit-s-rynka> (дата обращения: 22.05.2022).
52. Why Are Robotics Companies Dying? // URL: <https://www.forbes.com/sites/cognitive-world/2018/10/29/why-are-robotics-companies-dying/amp> (дата обращения: 25.05.2022).
53. Honda прекращает разработку роботов Asimo // URL: <https://3dnews.ru/971894/honda-prekrashchaet-razrabotku-robotov-asimo> (дата обращения: 27.05.2022).
54. Honda's Asimo robot bows out but finds new life // URL: <https://asia.nikkei.com/Business/Companies/Honda-s-Asimo-robot-bows-out-but-finds-new-life> (дата обращения: 27.05.2022).
55. Levy F., Murnane R. Dancing with Robots. URL: <http://www.thirdway.org/report/dancing-with-robots-human-skills-for-computerized-work> (дата обращения: 27.05.2022).
56. Autor D.H. Polanyi's Paradox and the Shape of Employment Growth. MIT, NBER and JPAL, September 3, 2014.
57. Paolillo, A., Colella, F., Nosengo, N., Schiano, F., Stewart, W., Zambrano, D., Chappuis, I., Lalive, R., & Floreano, D. (б. д.). How to compete with robots by assessing job automation risks and resilient alternatives. *Science Robotics*, 7(65), eabg5561. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.abg5561>.
58. Huang M-H, Rust RT. Artificial Intelligence in Service. *Journal of Service Research*. 2018;21(2):155-172. doi:10.1177/1094670517752459.
59. Decker M., Fischer M. and Ott I. (2017) Service robotics and human labor: a first technology assessment of substitution and cooperation. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 87, January, pp. 348-354.
60. Nourbakhsh I.R. (2015) The coming robot dystopia – all too inhuman. *Foreign Affairs*, Vol. 94. No. 4, pp. 23-28.
61. Robotics: Ethics of artificial intelligence // *Nature*, 521, pp. 415–418 (28 May 2015). URL: <https://www.nature.com/news/robotics-ethics-of-artificial-intelligence-1.17611> (дата обращения: 27.05.2022).
62. Veruggio G. EURON Roboethics Roadmap. IEEE RAS Technical Committee on Robotics. Geneva, January 2007.
63. Weng, Y.H., Chen, C.H., Sun, C.T. Toward the Human–Robot Co-Existence Society: On Safety Intelligence for Next Generation Robots. *Int J of Soc Robotics* (2009) 1: 267. <https://doi.org/10.1007/s12369-009-0019-1>.
64. Шмырев В.И., Щербаков М.В. Безопасность гуманоидных и антропоморфных роботов в неконтролируемых средах // *Человеческий капитал*. 2014. № 11 (71). С. 134–136.
65. Subramony M., Solnet D., et al. (2018). Service Work in 2050: Toward a Work Ecosystems Perspective. *Journal of Service Management*. 29(5). DOI: 10.1108/JOSM-05-2018-0131
66. Zawieska, Karolina. (2015). Do robots equal humans? Anthropomorphic terminology in LAWS. Conference: 2015 UN CCW Informal Meeting of Experts on Lethal Autonomous Weapons Systems, At Geneva, Switzerland.
67. Report of COMEST on Robotics Ethics. UNESCO, 2017.
68. Złotowski J., Proudfoot D., Yogeewaran K., Bartneck C. Anthropomorphism: Opportunities and Challenges in Human–Robot Interaction *Int J of Soc Robotics* (2015), Vol. 7, pp.347–360. DOI 10.1007/s12369-014-0267-6
69. Robert, L. P. (2017). The Growing Problem of Humanizing Robots, *International Robotics & Automation Journal*, 3(1), DOI: 10.15406/iratj.2017.03.00043
70. Mori M. (1970) The uncanny valley. *Energy* 7(4):33–35.
71. Darling, Kate, 'Who's Johnny?' Anthropomorphic Framing in Human-Robot Interaction, Integration, and Policy (March 23, 2015). *ROBOT ETHICS 2.0*, eds. P. Lin, G. Bekey, K. Abney, R. Jenkins, Oxford University Press, 2017, Forthcoming. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2588669> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2588669>
72. Alok Nath, Goutam Das, Anik Mallick, and Shovan Chowdhury. Design, implementation and stabilization of a Bipedal robot // *AIP Conference Proceedings* 1919, 020023 (2017); <https://doi.org/10.1063/1.5018541> Published Online: 28 December 2017.

73. Bethel CL, Salomon K, Murphy RR (2009) Preliminary results: humans find emotive non-anthropomorphic robots more calming. In: Proceedings of the 4th ACM/IEEE international conference on human–robot interaction, HRI’09, pp 291–292.
74. Kai Chi Yam, Yochanan Bigman, Kurt Gray. Reducing the uncanny valley by dehumanizing humanoid robots // *Computers in Human Behavior*, Volume 125, 2021, 106945, <https://doi.org/10.1016/j.chb.2021.106945>
75. Hauer C (2021) Should we trust robots? The ethical perspective. In: *Trust in Human-Robot Interaction*, Elsevier, pp 531–551. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819472-0.00023-x>
76. Abney, K. 2017. *Robot Ethics 2.0: New Challenges in Philosophy, Law, and Society*. Oxford University Press.
77. Borenstein J.; Wagner A.; Howard A. M. 2017. A case study in caregiver overtrust of pediatric healthcare robots. *RSS Workshop on Morality and Social Trust in Autonomous Robots*, Cambridge, MA.
78. Robinette, P.; Li, W.; Allen, R.; Howard, A. M.; and Wagner, A. R. 2016. Overtrust of robots in emergency evacuation scenarios. Paper presented at the Human-Robot Interaction (HRI), 2016.
79. Shah, Huma; Warwick, Kevin; Vallverdú, Jordi; Wu, Defeng (2016). «Can machines talk? Comparison of Eliza with modern dialogue systems» (PDF). *Computers in Human Behavior*. 58: 278–95. doi: 10.1016/j.chb.2016.01.004.
80. Hartzog, Woodrow. 2015. “Unfair and Deceptive Robots.” *Maryland Law Review* 74:785-829.
81. Wagner, A.R. & Arkin, R.C. Acting Deceptively: Providing Robots with the Capacity for Deception // *Int J of Soc Robotics* (2011) 3: 5. <https://doi.org/10.1007/s12369-010-0073-8>.
82. Tanaka F., Kimura T. The use of robots in early education: A scenario based on ethical consideration. The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2009. ROMAN 2009. 10 November 2009. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5326227> (дата обращения: 27.05.2022).
83. Ethics in Engineering. URL: <https://www.asme.org/about-asme/governance/ethics-in-engineering> (дата обращения: 27.05.2022).
84. ACM Code of Ethics. URL: <https://www.acm.org/code-of-ethics> (дата обращения: 26.05.2022).
85. Ingram, B., Jones, D., Lewis, A., Richards, M., Rich, C., and Schachterle, L. (2010). A code of ethics for robotics engineers. In Proceedings of the 5th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI).
86. Riek, Laurel D. and Howard, Don, A Code of Ethics for the Human-Robot Interaction Profession (April 4, 2014). Proceedings of We Robot, 2014. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2757805> (дата обращения: 26.05.2022).

ГЛАВА 19.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СЕРВИСНЫХ РОБОТОВ ДЛЯ ДОМАШНЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Личные сервисные роботы (для домашнего использования) первоначально были предназначены для оказания помощи в ежедневной жизни людям с физическими или психическими сложностями. К таким роботам относятся роботы-пылесосы, роботы для мытья окон, чистки бассейнов, стрижки газонов и др. Самая большая группа сервисных роботов для домашнего использования – роботы-пылесосы. Роботы-пылесосы предназначены для сухой и влажной уборки помещений с различными видами напольных покрытий (некоторые модели роботов-пылесосов могут проводить уборку ковровых покрытий с длинным ворсом). Глава подготовлена на основе статьи*.

ПОКОЛЕНИЯ РОБОТОВ-ПЫЛЕСОСОВ

В 1997 г. был представлен первый прототип робота-пылесоса компании Electrolux, в 2002 г. – роботы первого поколения (робот-пылесос Roomba компании iRobot и Electrolux Trilobite компании Electrolux); роботы первого поколения работали до полного заполнения резервуара для мусора, после чего для продолжения уборки помещения было необходимо очистить его вручную. В 2004 г. Electrolux выпустила робот-пылесос второго поколения Trilobite 2.0 (при заполнении своего резервуара для мусора пылесос опорожняет его в резервуар базовой станции, который больше по объему, и одновременно заряжается; робот прекращает уборку в случае полного выполнения работы или полного заполнения всех резервуаров, что значительно повышает время работы робота-пылесоса; кроме этого пылесос с помощью инфракрасного сенсора может сам определять дорогу к базовой станции).

Роботам 1-го и 2-го поколений указывался вручную размер комнаты (для чего были специальные кнопки на роботе). Выпуск роботов 3-го поколения решил эту проблему: с помощью датчиков (ультразвуковых, контактных, которые регистрируют удары о мебель, стены, бесконтактных или инфракрасных) роботы сами могут ориентироваться в пространстве.

У роботов-пылесосов 4-го поколения был увеличен срок работы (до 2 часов), они могут самостоятельно выбирать режим и скорость уборки в зависимости от степени загрязнения помещения, уровень шума снижен до 50 дБ; кроме этого, функция «виртуальной стены» позволяет ограничить территорию уборки.

В 2011 г. компания LG представила в России пятое поколение роботов-пылесосов (LG Hom-Bot). Робот оборудован датчиком (триангуляционным вращающимся дальномером), расположенным на верхней части корпуса, который сканирует потолок и получает информацию о собственном местонахождении; датчик, расположенный на нижней части

* Комкина Т.А., Никонова М.А., Дубинина М.Г. Техничко-экономический анализ отдельных видов сервисных роботов // Экономический анализ: теория и практика. 2020. Т. 19. Вып. 10. Октябрь С. 1965–1986. DOI: <https://doi.org/10.24891/ea.19.10.1965>

корпуса, считывает информацию о покрытии пола, о возможных препятствиях или лестнице, не позволяя роботу упасть со ступенек или помогая правильно выбрать режим уборки.

Крупнейшими компаниями, работающими на рынке, являются Dyson Ltd. (Великобритания), Ecovacs Robotics Inc. (США), Infinuvo (США), iRobot Corporation (США), Koninklijke Philips NV (Нидерланды), LG Electronics Inc. (Южная Корея), Neato Robotics Inc. (США), Intellibot Robotics LLC (США), Yujin Robot Co. Ltd. (Южная Корея) и Samsung Electronics Co. Ltd. (Южная Корея).

Основными характеристиками роботов-пылесосов являются: мощность, емкость аккумулятора, время работы, время зарядки, емкость пылесборника, вес. С развитием роботов-пылесосов происходит снижение веса робота (с 3,5 до 2 кг), времени зарядки (с 6 до 4 часов), потребляемой мощности (с 25 до 20 Вт), уровня шума (с 90 до 50 дБ), при этом увеличиваются емкость аккумулятора (с 2000 до 2600 мА*ч), емкость пылесборника (с 300 до 450 мл) и время работы (с 90 до 150 мин.). Кроме этого, в более поздних моделях роботов-пылесосов есть функция обеззараживания воздуха ультрафиолетом, возможность речевого воспроизведения действий и принудительного возврата пылесоса на базу (команда дается с пульта), функция влажной уборки, наличие турбощетки, возможность программировать уборку по графику.

АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РОБОТОВ-ПЫЛЕСОСОВ

В данном разделе исследования проводился анализ технико-экономических показателей роботов-пылесосов, производимых фирмой «Китфорт» (единственная российская фирма-производитель роботов-пылесосов [1]), см. табл. 1.

Таблица 1

Технические параметры роботов-пылесосов

Модель робота-пылесоса	503	504	512	519	520	518
Цена (руб.)	14 990	14 590	14 590	12 490	10 990	10 490
Мощность (Вт)	25	25	25	20	24	20
Емкость аккумулятора (мА*ч)	2000	2000	2200	2600	2200	2600
Время работы (мин)	90	90	90	135	100	120
Время зарядки (час)	1,5	1,5	5,5	5	4,5	4,5
Емкость пылесборника (мл)	300	500	350	450	300	300
Вес нетто (кг)	3,5	3,5	3,5	2,2	2,8	2,1

Источник: [1].

Анализ показал, что по мере развития роботов-пылесосов компании происходило снижение цены роботов и их веса, повышение емкости аккумулятора и, соответственно, времени зарядки батареи. Увеличение мощности роботов приводит к увеличению их веса. При этом роботы, имеющие больший вес (и, соответственно, большую мощность), стоят дороже. Развитие рынка аккумуляторов (и их техническое развитие) привело к тому, что роботы, имеющие больший вес (несмотря на мощность самого робота) могут работать меньше времени без подзарядки, чем более легкие роботы. В то же время из-за того, что аккумуляторы становятся более легкими и меньшего размера, отмечается обратная зависимость веса робота и емкости его аккумулятора.

Для выбранной группы моделей роботов-пылесосов были построены модели взаимозависимости технических показателей и зависимости цены от технических показателей. Для этого использовалась линейная регрессионная модель вида:

$$Y_i = b_i + a_i x_i,$$

где Y_i – эндогенный показатель (цена робота, руб.), x_j – технические (экзогенные) показатели (x_1 – мощность, Вт; x_2 – время работы, мин; x_3 – вес нетто, кг; x_4 – емкость аккумулятора, мА·ч; x_5 – время зарядки, ч; x_6 – высота робота, см).

В результате были построены следующие двухфакторные модели:

$$Y_1 = -19476,7 + 136,73 x_2 + 6224,08 x_3, R^2 = 0,95.$$

Как видно из модели, более дорогие роботы-пылесосы являются более тяжелыми. В то же время с увеличением времени работы робота происходит повышение его цены.

$$Y_1 = -38433,3 + 1646,67 x_1 + 133,33 x_2, R^2 = 0,98.$$

Увеличение мощности роботов-пылесосов и времени их работы также приводит к росту цены на них.

Также были получены однофакторные зависимости:

$$Y = -25,14 + 563,24 x_1, R^2 = 0,50,$$

$$Y = 5517,7 + 2558,7 x_3, R^2 = 0,74,$$

$$Y = 24\,761 - 5,18 x_4, R^2 = 0,51,$$

$$Y = 89,225 + 0,0028 x_5, R^2 = 0,56.$$

Таким образом, анализ факторов, влияющих на изменение цены роботов-пылесосов для домашнего использования, показал, что по мере повышения мощности роботов, времени их работы, веса, времени зарядки и высоты робота происходит повышение цены роботов-пылесосов. Полученная отрицательная корреляция цены робота-пылесоса с емкостью аккумулятора объясняется тем, что анализ проводился для всей выборки моделей роботов-пылесосов, а в более ранних моделях аккумулятор был меньшей емкости при более высокой цене.

На рис. 1, 2 представлены зависимости цены от емкости аккумулятора и веса робота-пылесоса.

Также были выявлены зависимости веса робота (Y_2) от его высоты, времени работы и мощности; емкости аккумулятора (Y_3) от веса робота; времени работы робота-пылесоса (Y_4) от времени зарядки, емкости аккумулятора и мощности:

$$Y_2 = -3,05 + 0,26 x_1, R^2 = 0,93,$$

$$Y_2 = 6,33 - 0,033 x_2, R^2 = 0,87,$$

$$Y_2 = 6,1731 + 0,8403 x_6, R^2 = 0,89,$$

$$Y_3 = 2,8878 + 0,0003 x_3, R^2 = 0,65,$$

$$Y_4 = 276,35 - 7,43 x_1, R^2 = 0,94,$$

$$Y_4 = -43,57 + 0,07 x_4, R^2 = 0,87,$$

$$Y_4 = 77,953 + 0,5827 x_5, R^2 = 0,53.$$

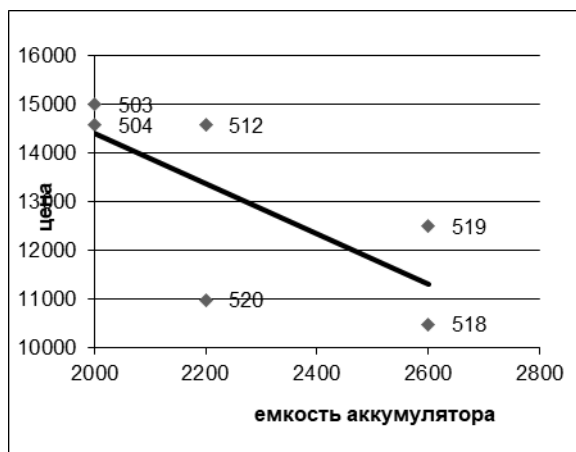


Рис. 1. Зависимость цены робота-пылесоса от емкости аккумулятора

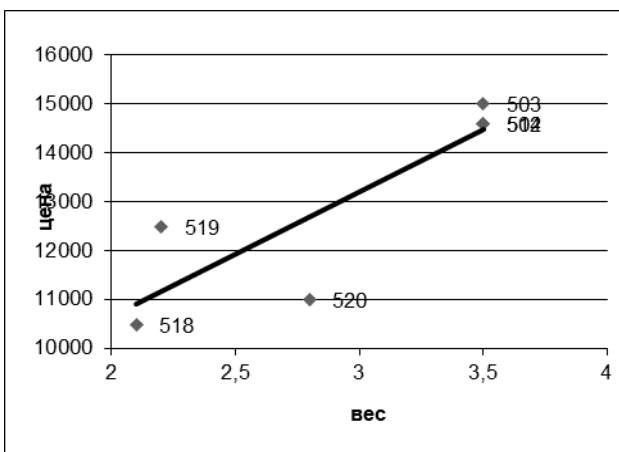


Рис. 2. Зависимость цены робота-пылесоса от веса

Источник: авторская разработка по данным [1].

Источник: авторская разработка по данным [1].

Таким образом, вес робота-пылесоса положительно коррелирован с его мощностью и высотой и отрицательно коррелирован со временем работы; емкость аккумулятора положительно коррелирована с весом робота-пылесоса; время работы положительно коррелировано с емкостью аккумулятора и временем зарядки и отрицательно коррелировано с мощностью робота-пылесоса.

На рис. 3–6 представлены зависимости времени работы робота-пылесоса от его мощности и емкости аккумулятора, и веса робота-пылесоса от времени его работы и мощности.

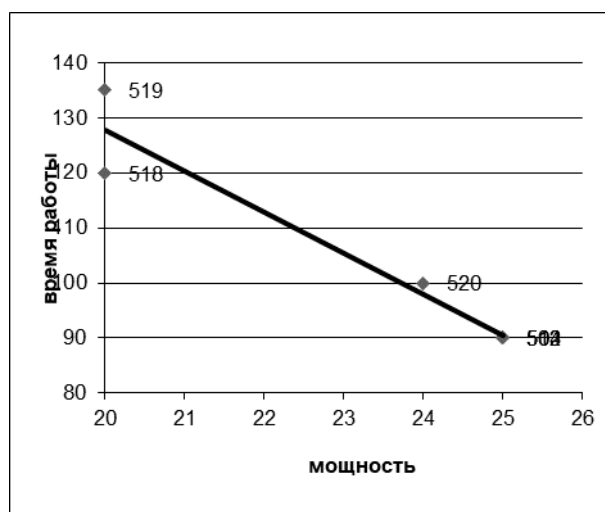


Рис. 3. Зависимость времени работы робота-пылесоса от его мощности

Источник: авторская разработка по данным [1].

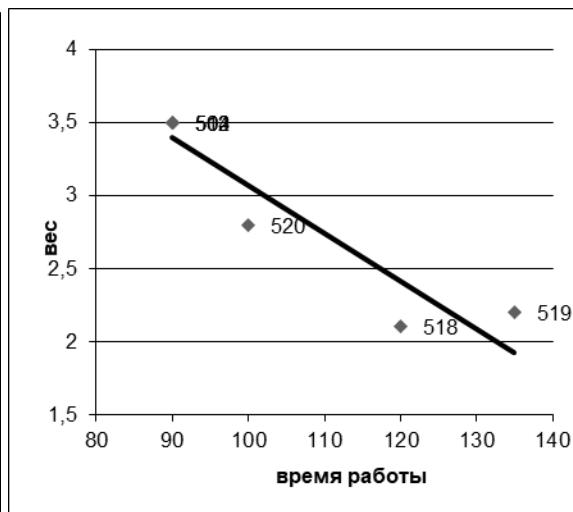


Рис. 4. Зависимость веса робота-пылесоса от его времени работы

Источник: авторская разработка по данным [1].

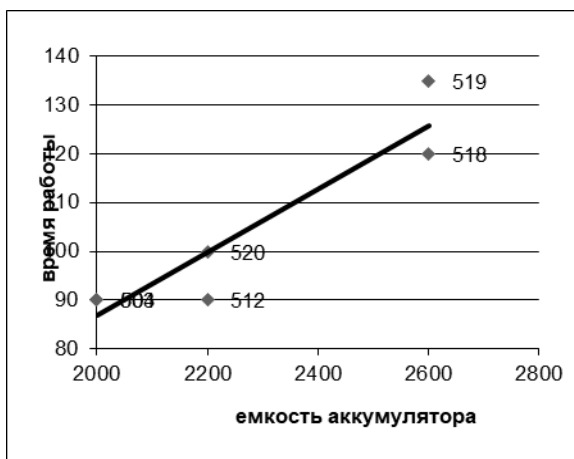


Рис. 5. Зависимость времени работы робота-пылесоса от емкости его аккумулятора

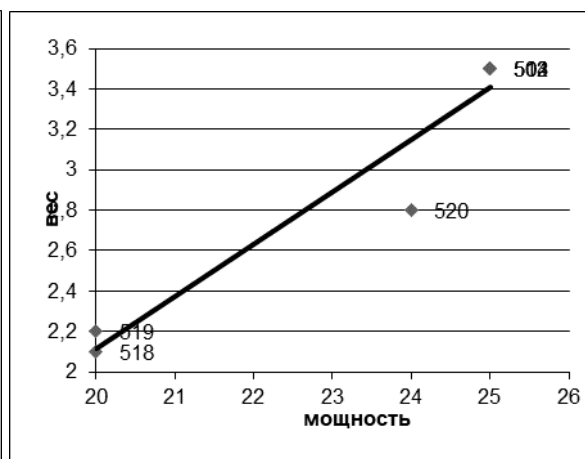


Рис. 6. Зависимость веса робота пылесоса от его мощности

Источник: авторская разработка по данным [1].

Источник: авторская разработка по данным [1].

Таким образом, вес роботов-пылесосов положительно коррелирован с их высотой, временем работы, емкость аккумулятора положительно коррелирована с весом робота, а время работы – с временем зарядки.

Кроме того, исследовались относительные показатели, такие как зависимости цены единицы мощности (Y_2), цены единицы веса (Y_3), емкости аккумулятора на единицу веса (Y_4) от тех же технических показателей $x_j, j = 1, \dots, 6$. Были получены следующие модели:

$$Y_2 = 262,79 + 12,28 x_3, R^2 = 0,96,$$

$$Y_3 = 1158,83 + 7,35 x_1, R^2 = 0,95,$$

$$Y_4 = -154,09 - 10,17 x_1, R^2 = 0,95.$$

Таким образом, цена единицы мощности увеличивается с ростом веса, цена единицы веса – со снижением мощности, емкость аккумулятора на единицу веса увеличивается со снижением мощности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование технико-экономических показателей роботов-пылесосов позволяет сделать следующие выводы. Тенденции миниатюризации элементов питания сказываются и на весе, размерах и времени работы роботов-пылесосов. Поэтому можно ожидать, что в дальнейшем будет увеличиваться время работы роботов-пылесосов, их мощность и емкость аккумуляторов при одновременном возможном снижении веса. Результаты проведенного моделирования свидетельствуют, что рост мощности роботов-пылесосов и времени их работы может привести к росту цены на них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Сайт фирмы «Китфорт». URL: <http://kitfort.ru/> (дата обращения: 06.02.2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного анализа и межстрановых сопоставлений развития робототехники показывают, что для России в первую очередь необходима реиндустриализация. Приоритет должен быть отдан развитию обрабатывающих производств, выпускающих инвестиционную продукцию, а также сфере НИОКР. При этом, так как индустриализация нацелена на повышение производительности труда, то следует особое внимание уделять роботизации производства. В то же время необходимо учитывать неблагоприятную демографическую ситуацию, старение населения, повышающие потребность в роботах для сельского хозяйства, строительства, а также учитывать развитие медицинских роботов и роботов по уходу за пожилыми людьми. Наконец, проблемы национальной безопасности в условиях усиления глобальной нестабильности, появления новых средств нападения повышают спрос на прогрессивные виды БПЛА. Очевидно, прежде всего необходимо изменение макро- и микроэкономической политики. Требуется воссоздание систем долгосрочного индикативного планирования, для чего следует использовать опыт разработки Комплексных программ научно-технического прогресса.

Коллективная монография

ПРОБЛЕМЫ И ПОКАЗАТЕЛИ
РАЗВИТИЯ РОБОТОТЕХНИКИ

Подписано в печать 10.10.2022 г.
Формат 60×90/16. Печ. л. 14,8. Тираж 100 экз. Заказ № 6
ФГБУН Центральный экономико-математический институт РАН
117418, Москва, Нахимовский пр., 47
Тел. 8 (499) 724-21-39
E-mail: ecr@cemi.rssi.ru
<http://www.cemi.rssi.ru/>

ISBN 978-5-8211-0806-7



9 785821 108067