

АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ РОБОТОВ

Дубинина М.Г.

Статья посвящена анализу развития строительной робототехники на примере демонтажных роботов и строительных 3D-принтеров. Для демонтажных роботов зарубежных компаний построены модели зависимости логарифма цены от технических показателей и по поколениям. Для строительных 3D-принтеров (российских и зарубежных) построены модели зависимости логарифма цены от абсолютных и удельных технических показателей.

DOI: 10.20537/mce2022econ11

Введение. Строительство является одной из наименее автоматизированных отраслей экономики с высокой долей ручного труда. Одной из главных причин, по которой роботы в строительстве недостаточно распространены, является сложность их адаптации к строительной площадке с постоянно меняющейся окружающей средой, необходимость функционирования в неблагоприятных погодных условиях, включая изменения влажности и температуры, постоянное воздействие пыли и грязи [1]. Все эти факторы объясняют повышенные требования к функциональным возможностям строительных роботов и сложность их разработки. Тем не менее, некоторые виды роботов успешно используются в строительстве. В первую очередь это демонтажные роботы (demolition robots, роботы для сноса) и строительные 3D-принтеры.

Демонтажные роботы. По данным ассоциации Robotic Industries Association, на роботов для сноса приходится около 90% мирового рынка строительных роботов [2]. Они представляют собой вид профессиональных сервисных роботов, использующих различное навесное оборудование (отбойные молотки, дробилки, дрели или ковши). Возможность управления роботом дистанционно обеспечивает безопасность оператора.

В 2019 г. мировой рынок демонтажных роботов оценивался в 223.15 млн долл. [3]. По прогнозу компании BCC Research к 2027 г. он вырастет до 713.26 млн долл. [4].

Одной из ведущих мировых компаний, производящих такие роботы, является Brokk (Швеция). Ее роботы имеют большой радиус действия и широкий выбор навесного оборудования, что расширяет возможности применения этих роботов. Помимо сноса, демонтажные роботы Brokk также используются для ремонта цементных печей, в средах с повышенным риском (например, на атомных электростанциях), для работы с загрязненными материалами. К 2016 г. компания поставила на мировой рынок более 7 тыс. демонтажных роботов, к 2021 г. их число возросло до 8 тыс. В настоящее время линейка роботов компании насчитывает 9 моделей, всего же за период 1983–2021 гг. разработано более 30 моделей, включающих как достаточно миниатюрные (массой менее 400 кг), так и сверхтяжелые машины (массой свыше 11.5 т). Brokk входит как подразделение «Demolition & Tools» компании Lifco, выручка за счет продаж демонтажных роботов в 2020 г. составила 8.4% общих продаж Lifco [5].

Еще одна компания, предоставляющая услуги по сносу сооружений с помощью роботов — Husquarna (Швеция). Линейка дистанционно управляемых роботов компании в настоящее время состоит из 8 моделей массой от 967 до 2020 кг, радиусом действия от 3.7 до 5.5 м.

Для анализа динамики технико-экономических показателей демонтажных роботов на примере 41 модели, выпущенной в период 1991–2019 гг. (30 из которых произведены компанией Brokk и 11 — Husquarna), были рассмотрены такие характеристики как габариты, масса, рекомендуемый максимальный вес навесного оборудования, транспортная скорость, давление в системе, максимальный горизонтальный и вертикальный вылет стрелы, мощность двигателя, объем гидравлической системы, уровень шума, зона охвата радиосигнала, год выпуска и цена модели робота.

Выделены 4 поколения демонтажных роботов. Распределение по поколениям основано на годе выпуска моделей: 1-ое — 1981–2000 гг. — 5 моделей (Brokk 250, Brokk Mini Cut, Brokk 40 и др.); 2-ое — 2001–2011 гг. — 15 моделей (Brokk 50, Brokk 90, Brokk 330, DXR310 и др.); 3-е — 2012–2016 гг. — 12 моделей (Brokk 60, Brokk 100, DXR140, DXR270, DXR300 и др.); 4-ое — 2017–2021 гг. — 9 моделей (Brokk 170, Brokk500, Brokk520D, DXR 145 и др.).

Для различных поколений демонтажных роботов исследована динамика показателей отношения давления в системе к ее объему (рис. 1). Построенные зависимости свидетельствуют о росте показателя внутри поколения и при переходе от предыдущего поколения к последующему.

Также исследована динамика отношения выходной мощности мотора на единицу объема гидравлической системы (рис. 2).

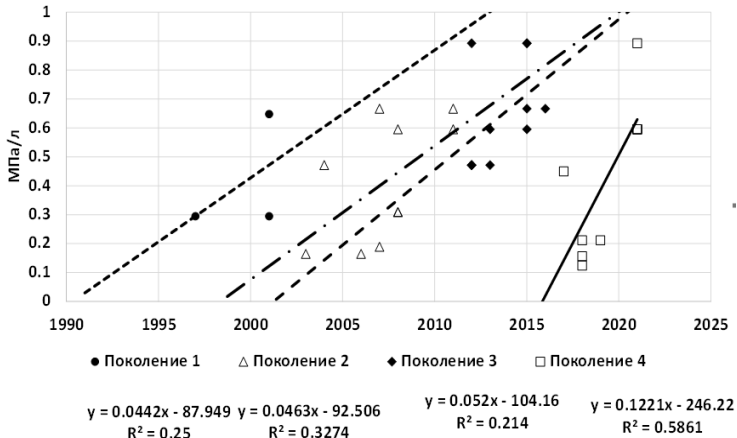


Рис. 1. Отношение давления в гидравлической системе к ее объему по поколениям демонтажных роботов (МПа/л).

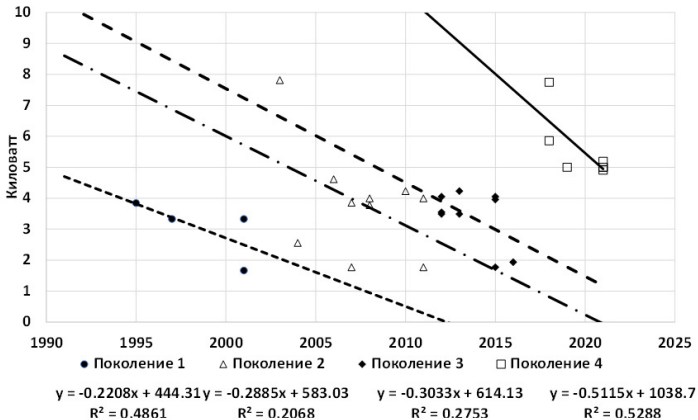


Рис. 2. Выходная мощность мотора робота на 1 л объема гидравлической системы, кВт.

Выходная мощность мотора в расчете на 1 л объема гидравлической системы снижается внутри поколения, но растет при переходе от предыдущего поколения к следующему.

При анализе роботизированных систем обычно исследуется зависимость цены от их технических показателей (см., например, [6, 7]). Для монтажных роботов Brokk и Husquarna построена модель вида

$$\ln(Y) = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_4 \cdot g_2 + a_5 \cdot g_3 + a_6 \cdot g_4 + b, \quad (1)$$

где Y — цена робота, тыс. долл.; x_1 — отношение давления в гидравлической системе, мПа, к ее емкости, л; x_2 — максимальный вылет стрелы, м; x_3 — масса робота без навесного оборудования, т; g_i — фиктивная переменная, равная 1, если модель робота принадлежит поколению i ($i = 2, 3, 4$), и 0 — в противном случае.

Полученные результаты (табл. 1) свидетельствуют о росте цены по поколениям, а также о положительной эластичности цены по показателю отношения давления в системе к емкости гидравлической системы, максимального вылета стрелы и отрицательной — по показателю массы робота без навесного оборудования.

Кроме того, была построена модель вида

$$\ln(Y) = b_4 \cdot x_4 + b_5 \cdot x_5 + b_6 \cdot g_2 + b_7 \cdot g_3 + b_8 \cdot g_4 + b_0, \quad (2)$$

где Y — цена робота, тыс. долл.; x_4 — отношение выходной мощности мотора, кВт, к массе робота без навесного оборудования, т; x_5 — максимальная транспортная скорость робота, км/ч.

Таблица 1. Оценки параметров моделей (1) и (2).

Переменная	Модель 1		Модель 2	
	параметр	t-статистика	параметр	t-статистика
x_1	1.21	2.35	...	...
x_2	0.77	3.86	...	...
x_3	-0.37	-2.25	...	...
x_4	...	...	-0.08	-2.81
x_5	...	...	1.10	3.96
g_2	0.65	2.24	2.18	6.41
g_3	0.67	2.16	2.06	6.78
g_4	0.97	2.79	2.99	7.03
C	0.52	0.71	0.80	0.79
R^2	0.68		0.76	

Таким образом, выявлен рост цены демонтажных роботов по поколениям, а также определено, что с увеличением мощности на единицу массы робота его цена снижается, а увеличение транспортной скорости повышает стоимость робота.

Строительные 3D-принтеры. Другое направление использования роботов в строительстве — 3D-принтеры для печати зданий и отдельных сооружений городской среды (мостов, скамеек и других). Строительный 3D-принтер — это машина, которая может строить дома, нанося слой за слоем материал (например, бетон). Технология 3D-печати в строительстве, по оценкам китайских специалистов компании WinSun, характеризуется снижением трудозатрат на 50–70%, сокращением сроков строительства на 30–60%, общим снижением стоимости строительства на 50–80% [8].

Однако 3D-принтеры еще не способны создать полностью функциональный дом. Возводятся только каркас и стены дома; другие элементы, такие как окна, электропроводку или водопровод, необходимо устанавливать отдельно.

В настоящее время в строительной отрасли преобладают два основных вида 3D-принтеров: порталные, используемые в основном для крупных строительных работ и на стройплощадках, и манипуляторные (с роботизированным манипулятором), которые, в основном, используются для более мелких и сложных компонентов (например, принтеры Vertico на основе манипулятора ABB, Cazza X1 и X1 Core). Эти технологии выдавливают бетон или раствор слоями, и вся конструкция строится снизу-вверх, размещая слой за слоем бетона по шаблону, заданному входными данными 3D-модели. Портальные принтеры за счет своей жесткой конструкции обеспечивают высокую точность положения сопла даже на высоких скоростях. Роботы-манипуляторы, имеющие 6 степеней свободы, придают соплу 3 степени свободы перемещения и 3 степени свободы вращения. За счет этого экструзию можно осуществлять в любой точке пространства, в любом направлении (в рабочем пространстве робота) [9].

В 2021 г. рынок строительства зданий с помощью 3D-печати оценивался компанией The Business Research Company примерно в 10 млн долл. и прогнозировался его рост до 870 млн долл. к 2026 г. [10].

Результат 3D-печати во многом зависит от используемого материала, который должен подходить для принтера и области применения (наружного или внутреннего). К таким материалам относят бетон, пла-

стик, металл, различные порошковые смеси. Каждая компания разрабатывает свою рецептуру, которая соответствует устройству принтера и его сопла, а также специфике готовых изделий. На долю материалов из бетона в 2019 г. приходилось 46.6% общего объема рынка. Ожидается, что к 2023 г. доля бетона в используемых материалах вырастет до 52.9% (60.3 млн долл.) [11].

По данным разработчиков Cazza X1, использование 3D-принтера компании позволяет снизить издержки на 40% и существенно сократить время строительства (бетонные конструкции, создаваемые принтером, застывают за 7 дней, тогда как при традиционном строительстве – от 28 дней). При этом создаваемая конструкция способна выдержать давление до 47 МПа [12]. По оценкам специалистов, стоимость производства стены размером 2.7 x 5 м, сделанной из 40 т материала, составляет всего 48 евро (включая затраты на электроэнергию) [13].

Анализ технико-экономических характеристик этого вида строительных роботов произведен на примере 14 строительных 3D-принтеров производства компаний США, Италии, Словении, Франции, Нидерландов 2014–2019 гг. выпуска. Для этих роботов исследовались такие показатели, как скорость печати, размер печатаемого слоя, габариты принтера, его масса. Построена модель зависимости цены (y , тыс. долл.), от технического показателя, равного произведению площади печатаемой поверхности на скорость печати (x , м³/сек) и от года разработки модели ($t = T - 2013$):

$$Y = 1.31x + 55.7t - 142.6, R^2 = 0.81.$$

(5.8) (3.9) (-2.1)

Таким образом, выявлена положительная корреляция цены строительного 3D-принтера с его техническим показателем и годом выпуска.

Строительные 3D-принтеры в России. В июле 2021 г. в России принята «Стратегия развития аддитивных технологий»¹, в которой ставится задача создать серийное производство оборудования для строительной 3D-печати. В настоящее время разработку 3D-принтеров в России производят компании «Спецавиа» (Ярославль), Apis Cor, Betonator.

Среди российских производителей строительных 3D-принтеров выделяется компания «Спецавиа», в линейке роботов которой в общей сложности насчитывается 14 моделей разного размера и назначения.

¹ Стратегия развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года. - URL: <https://minpromtorg.gov.ru/docs/>

Для этих строительных 3D-принтеров была построена модель зависимости логарифма цены (Y , тыс. руб.) от объема печатаемого сооружения (x_1 , м³) и отношения потребляемой ими мощности к массе принтера (x_2 , кВт/т):

$$\ln Y = 0.0015x_1 + 0.2x_2 + 6.9, R^2 = 0.94.$$

(12.6) (2.4) (31.0)

Выявлена положительная корреляция цены строительного 3D-принтера компании «Спецавиа» с размером печатаемого сооружения и удельной мощностью принтера в расчете на 1 т массы.

Заключение. Развитие демонтажных роботов передовых компаний мира идет в направлении расширения модельного ряда, создания как крупных, так и небольших маневренных роботов, способных выполнять задачи в условиях ограниченного пространства, подниматься по лестницам и преодолевать узкие дверные проемы.

Цена демонтажных роботов растет по поколениям, выявлена положительная эластичность цены по показателям отношения давления к емкости гидравлической системы, максимального вылета стрелы, транспортной скорости, и отрицательная — по массе робота без навесного оборудования, а также мощности мотора на единицу массы робота.

Среди российских разработок преобладают большие демонтажные роботы. Следует отметить, что в 2022 г. Минстрой России утвердил изменения в «Правилах производства работ при демонтаже и утилизации», в результате при проведении таких работ разрешено использование электрогидравлических роботов, экскаваторов-разрушителей со стрелами до 60 м и навесным оборудованием [14]. Все это должно способствовать расширению применения демонтажных роботов на строительных площадках России при проведении программы реновации.

Рассмотренные в работе строительные 3D-принтеры имеют высокую стоимость, и их цена продолжает расти по мере усовершенствования конструкции. В то же время растет отношение объема печатаемой конструкции к объему, занимаемому принтером, что свидетельствует о прогрессе в этой области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дубинина М.Г.* Использование роботов в строительстве // Научно-практический журнал "Концепции". - Москва. – 2015. - №2 (34). С.36-45.
2. Construction Robots Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2022 - 2027). URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/construction-robots-market>
3. Demolition Robot Market Outlook – 2027. URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/demolition-robots-market>
4. Global Demolition Robots Market Size By Product Type, By Application, By Geographic Scope And Forecast. URL: <https://www.bccresearch.com/partners/verified-market-research/global-demolition-robots-market.html>
5. Lifco. Annual Report 2020. URL: https://wp.lifco.se/app/uploads/eng_lifco_arsredovisning_2020_a4-4.pdf
6. *Комкина Т.А., Никонова М.А., Дубинина М.Г.* Техничко-экономический анализ отдельных видов сервисных роботов // Экономический анализ: теория и практика. - т. 19, вып. 10, октябрь 2020. – С. 1965–1986. DOI: <https://doi.org/10.24891/ea.19.10.1965>.
7. *Дубинина В.В.* Анализ технико-экономических показателей промышленных роботов // Анализ и моделирование экономических и социальных процессов / Математика. Компьютер. Образование: Сб. научн. трудов. Выпуск 28. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2021. DOI: 10.20537/mce2021econ11.
8. *Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Тхань Куй.* Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 7 (118). С. 863–876. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876.
9. *Carneau P., Mesnil R., Roussel N., Baverel O.* Additive manufacturing of cantilever -from masonry to concrete 3D printing // Automation in Construction, Elsevier, 2020, 116, pp.103184. 10.1016/j.autcon.2020.103184. hal-03026642.
10. How Does The 3D Printing Building Construction Market Provide Economic Benefits? URL: <https://www.thecowboychannel.com/story/45575155/how-does-the-3d-printing-building-construction-market-provide-economic-benefits>
11. Global 3D Printing Building Construction Market. URL: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/3d-printing-building-construction-market>
12. Cazza Construction представляет первые данные о строительном роботе X1. URL: <https://www.3dpulse.ru/news/stroitelstvo/cazza-construction-predstavlyaet-pervye-dannye-o-stroitelnom-robot-e-x1/>
13. BigDelta WASP 12MT 3D Printer. URL: <https://top3dshop.com/product/bigdelta-wasp-12mt-3d-printer>

14. Минстрой России обеспечил внедрение лучших практик при демонтаже и утилизации объектов строительства. URL:
<https://www.minstroyrf.gov.ru/press/minstroy-rossii-obespechil-vnedrenie-luchshikh-praktik-pri-demontazhe-i-utilizatsii-obektov-stroitel/>

ANALYSIS OF TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF CONSTRUCTION ROBOTS

Dubinina M.G.

The article is devoted to the analysis of the development of construction robotics on the example of demolition robots and construction 3D printers. For demolition robots of foreign companies, models of the dependence of the logarithm of the price on technical indicators and by generations were built, For construction 3D printers (Russian and foreign), models are constructed for the dependence of the logarithm of the price on absolute and relative technical indicators.