

УДК 69.002.5

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОТ ПО УСТРОЙСТВУ КАМЕННОЙ КЛАДКИ

Н.Р. Таджиев

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. Одним из важнейших вопросов в строительстве является срок возведения зданий. Ускорить строительство зданий можно с помощью роботизированной техники. В статье описаны строительные роботы и манипуляторы зарубежного производства (SAM100, HADRIAN X, In-Situ Fabricator, FlyBrick, KUKA), а также приведено описание российского робота-каменщика "Виктория Brick" и мобильного роботизированного комплекса для автоматизации процесса кирпичной кладки, разработанного учеными из Брестского государственного технического университета (Республика Беларусь). На основании теплотехнического расчета была определена энергоэффективность каменной кладки, выполненной в два с половиной кирпича ручным способом на основе цементно-песчаного раствора и роботизированным способом с использованием клея Polynor Thermo Block российского производства. В условиях необходимости импортозамещения необходимо обратить внимание на отечественные разработки в сфере робототехники. Дальнейшие исследования предполагается дополнить оценкой долговечности рассмотренных видов кирпичной кладки (на цементно-песчаном растворе и клее для каменной кладки Polynor Thermo Block).

Ключевые слова: автоматизация, роботизация, роботизированная техника, робототехника, роботы-строители, роботы-каменщики, строительные роботы, кирпичная кладка, каменная кладка, мобильные роботизированные комплексы, SAM100, HADRIAN X, In-Situ Fabricator, FlyBrick, KUKA, энергоэффективность, теплотехнический расчет, ограждающие конструкции, Polynor Thermo Block.

Ссылка для цитирования: Таджиев Н.Р. Автоматизация работ по устройству каменной кладки // Инженерные исследования. 2023. №1 (11). С. 38-45. EDN: TWMVKR.

AUTOMATION OF WORK ON THE DEVICE OF MASONRY

N.R. Tadzhiyev

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. One of the most important issues in construction is the term of construction of buildings. You can speed up the construction of buildings with the help of robotic technology. The article describes foreign-made construction robots and manipulators (SAM100, HADRIAN X, In-Situ Fabricator, FlyBrick, KUKA), as well as a description of the Russian robot mason "Victoria Brick" and a mobile robotic complex for automating the brickwork process, developed by scientists from Brest State Technical University (Republic of Belarus). Based on the heat engineering calculation, the energy efficiency of masonry, made in two and a half bricks manually based on a cement-sand mortar and robotically using Russian-made Polynor Thermo Block glue, was determined. In the context of the need for import substitution, it is necessary to pay attention to domestic developments in the field of work equipment. Further studies are supposed to be supplemented with an assessment of the durability of the considered types of brickwork (on cement-sand mortar and Polynor Thermo Block masonry adhesive).

Keywords: automation, robotics, robotic technology, masonry robots, construction robots, brickwork, masonry, mobile robotic complexes, SAM100, HADRIAN X, In-Situ Fabricator, FlyBrick, KUKA, energy efficiency, thermal design, enclosing designs, Polynor Thermo Block.

For citation: Tadzhiyev N.R. Automation of work on the device of masonry // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.1 (11). Pp. 38-45. EDN: TWMVKR.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время возрастает потребность в малоэтажном строительстве промышленных и гражданских объектов. Такие объекты в многие корпуса выполнены из кирпичной или газобетонной кладки [1]. За рубежом объем такого строительства превышает объем строительства панельных зданий. Аналогичная тенденция ожидается и на территории Российской Федерации.

Одним из важнейших вопросов в строительстве является срок возведения зданий. Ускорить строительство зданий можно с помощью роботизированной техники, однако на данный момент очень мало исследований и разработок, связанных с внедрением роботов в строительную отрасль. Кроме того, исследования в основном проводятся в сфере проектирования роботов, а исследования с точки зрения гражданского строительства практически не ведутся [1].

Использование роботизированной техники имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными технологиями [2]:

- роботы позволяют минимизировать количество ошибок, обеспечивают точность установки;
- сокращают сроки возведения, гарантируют экологичность в процессе строительства.

Применению технологий автоматизации и роботизации в строительстве посвящен целый ряд работ [1-5]. Михеев Г.В. обосновал использование роботизированной техники в строительной отрасли и выявил показатели, препятствующие использованию автоматизации и роботизации в России [3]. Турчанинов Г.Е. и Волкова С.В. изучили вопрос необходимости использования современных BIM-технологий и робототехники на всех этапах возведения строительных объектов [2]. Хабиров Т.Т. рассмотрел перспективы развития роботизации строительства в России, проанализировал ее возможные последствия, среди которых - сокращение количества наемных рабочих, исчезновение некоторых видов профессий за счет их неактуальности [4]. Отдельная группа работ посвящена использованию робототехники в дорожном строительстве [6-8]. Зарубежный опыт разработок роботов для применения в строительстве представлен в статье [9, 10]. Артеменко М.Н., Корчагин П.А., Тетерина И.А. описали основные тенденции развития мобильных беспилотных роботизированных комплексов [10].

СТРОИТЕЛЬНЫЕ РОБОТЫ ДЛЯ КЛАДКИ КИРПИЧА

На данный момент небольшое количество компаний занимается созданием специальных роботов, позволяющих автоматизировать работы по каменной кладке. Наиболее известные компании, разработавшие роботов-каменщиков - Fastbrick Robotics и Construction Robotics.

SAM100 (Construction Robotics, США)

Робот SAM100 (рис.1) стал первым автоматизированным роботом-каменщиком, доступным для коммерческого использования. Он работает совместно с обученными каменщиками. Один каменщик должен маневрировать роботом, загружать его кирпичами и раствором, а другой - скрывать стяжки, удалять излишки раствора и укладывать кирпичи в углах и других труднодоступных местах.

SAM100 оснащен множеством датчиков для измерения и отслеживания скорости, угла наклона, ориентации, температуры снаружи и в корпусе, влажности, времени работы, GPS, безопасности и многого другого. Кроме того, он также может измерять уровень просадки и качество раствора.

Через несколько лет после выпуска робота SAM100 австралийская компания Fastbrick Robotics выпустила автоматизированную машину для укладки кирпича под названием Hadrian X. Этот робот технологически усовершенствован и обладает рядом новых характеристик.

HADRIAN X (Fastbrick Robotics, Австралия)

Робот Hadrian X (рис.2) был запатентован в 2008 году, а первое здание было построено с его помощью в 2019 году [1]. На создание модели было собрано более \$36 млн. Проблема этого робота - в невозможности кладки кирпича с помощью стандартного раствора.

В Hadrian X вместо традиционного раствора используется промышленный клей, который увеличивает прочность конструкции в 4-5 раз. Это также повышает тепловую и акустическую эффективность здания на 70%. Использование клея сокращает время строительства, так как время схватывания значительно меньше по сравнению с цементным раствором.

Hadrian X управляет автоматической загрузкой, резкой, маршрутизацией и укладкой кирпича; он использует CAD для выполнения сквозной кладки. Он построен из стали, алюминия и композитных материалов из углеродного волокна. Hadrian X управляется сетью компьютеров, камерами технического зрения, серводвигателями и лазерным трекером, который контролирует положение укладки.

Hadrian X способен возвести дом всего за 48 часов, укладывая по 1000 кирпичей в час. Строительство ведется по чертежам в 3D CAD, загруженным в его операционную систему. До начала работы робот анализирует данные проекта, определяя положение каждого кирпича. После того, как чертеж ему будет

полностью «понятен», Hadrian X приступает к работе. Он способен при необходимости нарезать кирпичи, используя для этого специальный захват с резаком. В процессе кладки робот оставляет промежутки определенного размера, необходимые для монтажа бетонных и деревянных конструкций, труб и электропроводки.



Рис. 1. Робот-каменщик SAM100¹
Fig.1. Mason robot SAM100



Рис. 2. Укладка каменных блоков роботом HADRIAN X²
Fig. 2. Stone block laying with the HADRIAN X robot

Сам робот в ходе работ остается неподвижным – двигается только его многометровый манипулятор, который одновременно играет роль конвейера для подачи кирпичей. Клеевой раствор изготавливается в центральной части робота и подается под давлением к узлу манипулятора, в котором смесь наносится на кирпичи.

In-Situ Fabricator (ETH Zurich, Швейцария)

Робот In-Situ Fabricator (рис.3) имеет сравнительно небольшую массу и оснащен двумя компьютерами, один из которых отвечает за движения механической «руки»-манипулятора, а другой - за ориентирование.



Рис. 3. Робот-каменщик In-Situ Fabricator³
Fig.3. Mason Robot In-Situ Fabricator

¹ Робот-каменщик: как это работает [электронный ресурс]. - URL: <https://t-magazine.ru/pages/sam100/> (дата обращения: 13.02.2023)

² Робот - строитель Hadrian X построил здание всего за 3 рабочие смены [электронный ресурс]. - URL: <https://building-tech.org/> (дата обращения: 13.02.2023)

³ Роботы-каменщики: автоматизация процесса кирпичной кладки [электронный ресурс]. - URL: <https://os1.ru/event/9411-roboty-kamenshchiki-avtomatizatsiya-protssesa-kirpichnoy-kladki> (дата обращения: 13.03.2023)

Манипулятор оборудован лазерным дальномером. При перемещении манипулятора дальномер сканирует пространство вокруг робота и строит трехмерную схему окружающего пространства. Также в бортовую систему управления загружена цифровая модель постройки. Благодаря этим данным робот постоянно определяет свое положение в изменяющейся обстановке и ориентируется при выполнении строительных операций, что создает возможности для его автономной работы, которую он выполняет с точностью до миллиметра. Еще одним преимуществом In-Situ Fabricator является способность самостоятельно перемещаться по строительной площадке без помощи человека. Робот оснащен датчиками и камерами, которые позволяют ему не наткнуться на препятствия и людей во время движения.

Главным его достоинством, как считают разработчики, является способность адаптироваться и решать задачи при внезапных нестандартных изменениях обстановки на строительном объекте. Они считают, что это одна из первых машин, которая способна возводить нестандартные постройки, то есть проект которых может изменяться и адаптироваться к окружающим условиям непосредственно в процессе строительства. Исследователи продолжают работу по совершенствованию In-Situ Fabricator, т.к. по словам разработчиков действия робота пока «примитивны», он как бы «работает вслепую». Робот пока еще неуверенно и медленно ориентируется в обстановке после совершения каждого действия, чтобы полноценно выполнять работу с необходимой точностью, в будущем он должен ориентироваться с большой скоростью и прямо в процессе движения.

FlyBrick® fasad (ООО «Фасадные роботы и перцептроны», Россия)

В 2019 произведен действующий прототип робота FlyBrick (рис.4), в 2020 году доработка прототипа и опытная облицовка на объекте в Москве 5000 м², в 2021 году запуск продаж и аренды, продолжение подрядов.

Действующая модель FlyBrick предназначена для автономной работы по выполнению простых, цветных и рельефных видов облицовочной кладки стен зданий. Кладка выполняется на цементную клей-пену. Для автономной работы FlyBrick использует техническое зрение, манипулятор для перекладки кирпича со стандартных заводских поддонов на площадку высотного грузового подъемника, сам робот-укладчик, устройство для нанесения цементной клей-пены, и автомат для укладки армирующей сетки. Мачты подъемника крепятся к колоннам каркаса здания или опорам.

Преимущества перед аналогами:

- 1) Меньший вес, полный цикл, высотные здания, встроенность в технологически, цепочку поставок материала и его переработки.
- 2) Фигурная декоративная кладка. Система технического зрения, использование системы искусственного интеллекта для распознавания и корректировки кладки.
- 3) Приемлемая для строительных организаций стоимость аренды и покупки устройства, окупаемость и выгода применения

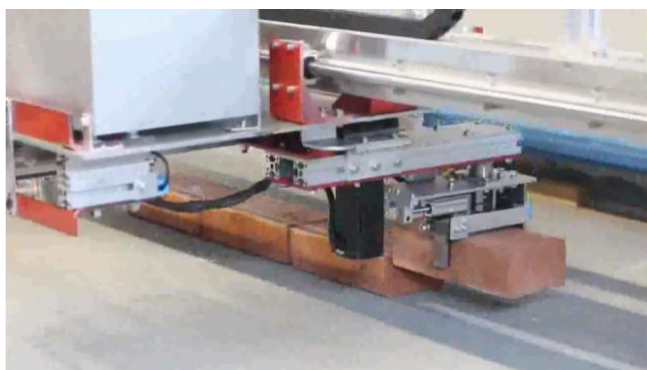


Рис. 4. Робот FlyBrick⁴
Fig. 4. FlyBrick Robot



Рис.5. Выполнение работ по кирпичной кладке роботом KUKA⁵
Fig. 5. Bricklaying with a KUKA robot

⁴ Робот-каменщик Flybrick [электронный ресурс]. - URL: <https://ru.startup.network/projects/406847.html> (дата обращения: 13.02.2023)

⁵ Строительный робот KUKA для укладки кирпичных блоков [электронный ресурс]. - URL: <https://www.youtube.com/watch?v=69ZzgCmboh8> (дата обращения: 13.02.2023)

Робот KUKA KR 10 (KUKA, Германия)

Разделение промышленных роботов по категориям у KUKA достаточно условное, модели из разных классов могут с одинаковым успехом использоваться для выполнения одной и той же задачи.

При выборе марки строительного робота-каменщика нужно учитывать следующие критерии: производитель, стоимость робот, скорость выполнения работ, функциональность, радиус досягаемости стрелы и т.д. В рамках исследования мы сравним характеристики и функциональность следующих марок строительных роботов-каменщиков: SAM100, Hadrian X, In-Situ Fabricator, Flybrick, KUKA KR 10.

Есть еще две разработки, которые могут с успехом стать успешными аналогами зарубежных роботов-каменщиков в условиях импортозамещения.

Виктория Vrick (Екатеринбург, Россия)

В 2020 году стартап из Екатеринбурга «Виктория BRICK» представил робота-каменщика (рис.6), который уже используется на стройках ГК «Виктория» в Екатеринбурге. За основу РТК взят промышленный манипулятор зарубежного производства. Захват идет с помощью вакуумного насоса, также в комплекте есть дозатор для строительного раствора.

Робот-каменщик из БрГТУ (Брест, Белоруссия)

В 2021 году ученые Брестского государственного технического университета представили опытный образец мобильного роботизированного комплекса для автоматизации процесса кирпичной кладки (рис.7).

Разработчикам удалось соединить грузовую тележку с коллаборативным роботом-манипулятором и обучить (запрограммировать) комплекс для выкладки фрагмента кирпичной кладки в ½ кирпича с имитацией нанесения растворного шва при помощи дозатора раствора.

Комплекс предназначен для автоматизации процесса кладки, снижения трудозатрат, повышения качества каменных работ. Комплекс оснащен встроенным техническим зрением, глубоко интегрированным в программное и аппаратное обеспечение, что позволяет обучать комплекс для реализации различных задач.

В настоящий момент ведутся работы по проектированию и конструированию дозатора раствора и подбора необходимых составов растворных смесей.



Рис.6. Робот-каменщик «Виктория BRICK»⁶
Fig. 6. Robot mason "Victoria BRICK"



Рис.7. Робот-каменщик из БрГТУ⁷
Fig. 7. Robot mason from BrGTU

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ КАМЕННОЙ КЛАДКИ, ВЫПОЛНЕННОЙ РОБОТИЗИРОВАННЫМ СПОСОБОМ

Нормируемое значение приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей стеновой конструкции для природно-климатических условий г. Санкт-Петербурга составляет:

$$R_0^{\text{норм}} = R_0^{\text{тр}} = 2,99 (\text{м}^2 \cdot \text{°C}) / \text{Вт} .$$

⁶ В Екатеринбурге представили стартап, заменяющий мигрантов на стройках [электронный ресурс]. - URL: https://eanews.ru/news/v-yekaterinburge-predstavili-startap-zamenyayushchiy-migrantov-na-stroykakh_20-10-2020 (дата обращения: 13.02.2023)

⁷ Робот-каменщик из БрГТУ [электронный ресурс]. - URL: <https://news.bstu.by/2021/03/28/робот-каменщик-из-бргту> (дата обращения: 13.02.2023)

Для определения энергоэффективности каменной кладки, выполненной в два с половиной кирпича (табл. 1) роботизированным способом, вместо цементно-песчаного раствора будет использоваться клей Polynor Thermo Block (Россия) со следующими характеристиками⁸:

- Основа: полиуретановый преполимер;
- Время отверждения (при +22°C) – 35 минут;
- Время полного отверждения – 12 часов;
- Термостойкость: от -60°C до +100°C;
- Цена: 690 рублей за 1 шт.;
- Объем одного баллончика: 850 мл;
- Коэффициент теплопроводности: $\lambda = 0,035$ Вт/(м·К).

Рекомендуемая толщина нанесения клея Polynor Thermo Block - от 3 до 10 мм⁹. Для дальнейших расчетов в качестве допущения примем толщину слоя в 7 мм.

Таблица 1. Теплотехнические характеристики ограждающей стеновой конструкции
Table 1. Thermal characteristics of the enclosing wall structure

Номер п/п	Материал	Толщина на слоя (δ), м	Коэффициент теплопроводности (λ), Вт/(м ² ·°C)	Плотность (ρ), кг/м
1	Кирпич лицевой пустотелый тёмно-коричневый, поверхность гладкая	0,62	0,31	1400
2	Клей для кладки Polynor Thermo Block	0,014	0,35	2000

Определим условное сопротивление теплопередаче $R_0^{усл}$ ограждающей конструкции по формуле (1):

$$R_0^{усл} = \frac{1}{\alpha_{в}} + \sum R_s + \frac{1}{\alpha_{н}}, \quad (1)$$

где $\alpha_{в}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций, Вт/(м²·°C), принимаемый по СП 50.13330.2012;

$\alpha_{н}$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции для условий холодного периода года, Вт/(м²·°C), принимаемый по СП 50.13330.2012;

R_s – термическое сопротивление слоя однородной части фрагмента, (м²·°C)/Вт, определяется по формуле (2):

$$R_s = \frac{\delta_s}{\lambda_s}, \quad (2)$$

где δ_s – толщина слоя, м;

λ_s – теплопроводность материала слоя, Вт/(м²·°C), принимается в зависимости от условия эксплуатации.

$$R_0^{усл} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,62}{0,31} + \frac{0,014}{0,35} + \frac{1}{23} = 0,115 + 2 + 0,04 + 0,0435 = 2,2 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$$

Аналогичные расчеты были выполнены для ручного и роботизированного способа производства работ для трех видов кладки, представленных на рис.8. Все результаты сведены в табл. 2.

⁸ Клей Polynor Fixo Pro [электронный ресурс]. - URL: https://www.polynor.ru/ru/products/fixo_pro (дата обращения: 13.03.2023)

⁹ Клей для блоков и кирпича Стимул К-63 [электронный ресурс]. - URL: <https://krasnodar.leroymerlin.ru/product/kley-dlya-blokov-i-kerpicha-stimul-k-63-13219925/> (дата обращения: 13.03.2023)

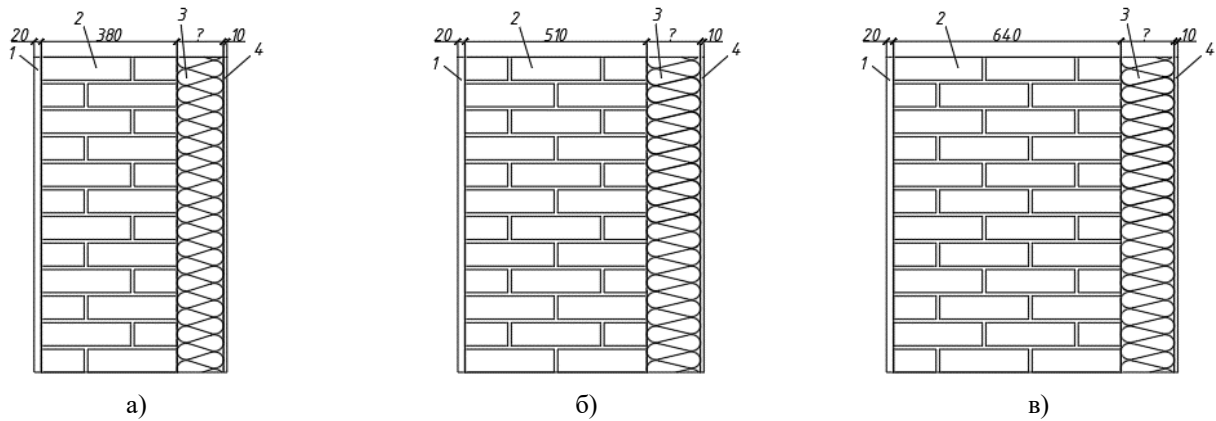


Рис.8. Виды кирпичной кладки: а - в полтора кирпича, б - в два кирпича, в - в два с половиной кирпича;

1 - внутренний слой штукатурки, 2 - кирпичная кладка, 3 - утеплитель, 4 - наружный защитно-декоративный слой штукатурки

Fig. 8. Types of brickwork: a - one and a half bricks, b - two bricks, c - two and a half bricks;

1 - inner layer of plaster, 2 - brickwork, 3 - insulation, 4 - outer protective and decorative layer of plaster

Таблица 2. Условное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций из кирпичной кладки на цементно-песчаном растворе и клее Polynor Thermo Block

Table 2. Conditional resistance to heat transfer of enclosing structures made of brickwork on cement-sand mortar and Polynor Thermo Block glue

Вид кладки	Толщина кладки (только кирпич), м	Кол-во слоев раствора/клея	Материал	Толщина, м	$R_0^{усл}$
Кладка в полтора кирпича (1,5) – 380мм (250+10+120мм)	0,37	1	Раствор	0,001	1,35
			Клей Polynor Thermo Block	0,003	1,36
				0,004	1,36
				0,005	1,37
				0,006	1,37
				0,007	1,37
				0,008	1,37
				0,009	1,38
				0,010	1,38
Кладка в два кирпича – 510 мм (250+10+250мм)	0,5	1	Раствор	0,001	1,77
			Клей Polynor Thermo Block	0,003	1,78
				0,004	1,78
				0,005	1,79
				0,006	1,79
				0,007	1,79
				0,008	1,79
				0,009	1,80
				0,010	1,80
Кладка в два с половиной кирпича (2,5) – 640 мм (250+10+250+10+120мм)	0,62	2	Раствор	0,001	2,16
			Клей Polynor Thermo Block	0,003	2,18
				0,004	2,18
				0,005	2,19
				0,006	2,19
				0,007	2,20
				0,008	2,20
				0,009	2,21
				0,010	2,22

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по результатам анализа роботизации процесса каменной (кирпичной) кладки, можно сделать следующие выводы:

1. Наименьшее значение условного сопротивления теплопередаче ограждающих стеновых конструкций имеют конструкции из кирпичной кладки на цементно-песчаном растворе (1,35-2,16 (м²·°C/Вт).

2. Стеновые конструкции из кирпичной кладки на клеевой основе (клей Polynor Thermo Block) показали лучший результат по теплотехническим характеристикам. В зависимости от толщины клеевой основы (3-10 мм) условное сопротивление теплопередаче оказалось выше на 1,5-2,6%.

3. Выбор строительного робота-каменщика определяется по нескольким критериям: технико-экономические показатели, скорость и качество работ, функционал робота, стоимость работ и т.д.

4. В условиях необходимости импортозамещения необходимо обратить внимание на отечественные разработки в сфере робототехники, такие, например, как «Виктория Brick» (Екатеринбург, Россия).

Дальнейшие исследования предполагается дополнить оценкой долговечности рассмотренных видов кирпичной кладки (на цементно-песчаном растворе и клее Polynor Thermo Block).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grigorian E. A., Surovenko V. B., Semenova M. D., Kormalova K. D. Automated masonry method with evaluation of its productivity and quality characteristics // Construction of Unique Buildings and Structures. 2019. No. 3(78). P. 7-22. DOI 10.18720/CUBS.78.1. EDN OGAQSO.

2. Турчанинов Г.Е., Волкова С.В. Цифровые инновационные технологии и роботизация в строительстве // Университетская наука. 2022. № 2(14). С. 200-202. EDN NUVOEH.

3. Михеев Г.В. Применение технологий автоматизации и роботизации в строительстве // Высокие технологии в строительном комплексе. 2022. № 1. С. 209-214. EDN QHJAMQ.

4. Хабиров Т.Т. Переход от ручного труда к роботизации в строительстве // Аллея науки. 2017. Т. 2, № -9. С. 645-649. EDN YULBZN.

5. Лаборов В.А., Гамаюнова О.С. Робототехника и BIM-технологии в строительстве // Инженерные исследования. 2021. № 5(5). С. 15-22. EDN FDKMVM.

6. Ерохин Я.С., Габдуллин Т.Р. Робототехника в дорожном строительстве // Техника и технология транспорта. 2019. № 2(12). С. 8. EDN LFTTYF.

7. Андреев Н.Ю., Горобец В.В., Османов Э.И., Пиндур С.В. Манипуляторы в дорожном строительстве // Вестник магистратуры. 2019. № 6-2(93). С. 90-93. EDN PFVYCS.

8. Артеменко М.Н. Совершенствование роботизированных дорожных строительных машин // Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Омск, 10-11 февраля 2022. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2022. С. 44-49. EDN TVTVZX.

9. Столярова Т.А., Ломиногин А.С., Туковская Л.А., Коротаев В.С. Зарубежный опыт разработок роботов для применения в строительстве // Строительство и недвижимость. 2020. № 2(6). С. 35-40. EDN LNSPFE.

10. Артеменко М.Н., Корчагин П.А., Тетерина И.А. Тенденции развития мобильных беспилотных роботизированных комплексов. опыт отечественных и зарубежных производителей // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2019. Т. 16, № 4(68). С. 416-430. EDN SQKEDM.

ОБ АВТОРАХ

Нурислом Рустамович Таджиев – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: tadzhiev.nr@edu.spbstu.ru

ABOUT THE AUTHORS

Nurislom R. Tadzhiev – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: tadzhiev.nr@edu.spbstu.ru