

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УДК 67.05; 69.002.5

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1450-1460

## Оценка возможности и целесообразности создания строительного РТК укладки газобетонных блоков

В.С. Лагута<sup>1</sup>, С.В. Калинин<sup>2</sup>, В.Э. Кузнецов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт производственных исследований; г. Москва, Россия;

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана); г. Москва, Россия;

<sup>3</sup> ГРАС ЖИЛСТРОЙ; г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В строительной отрасли развитию автоматизации на основе применения робототехнических систем способствует развитие строительных технологий и материалов, в частности применение газобетонных блоков (ГБ) увеличенных габаритов и веса. Из-за значительной стоимости создания и эксплуатации роботизированных комплексов, заменяющих рабочего на площадке, необходимо серьезное обоснование эффективности (инвестиционной привлекательности). Для этого следует укрупненно оценить стоимость и требуемое время на разработку и внедрение, поскольку универсальных и всеобъемлющих решений не существует.

**Материалы и методы.** Обобщен практический опыт решения проектных и конструкторских задач создания новой техники и разработки инвестиционных проектов для задачи создания строительного роботизированного технологического комплекса (РТК) укладки ГБ при возведении зданий и сооружений. Привлечены две группы экспертов — в области строительства и специалистов-разработчиков роботизированных и мехатронных систем. Используются методы экспертных оценок и математической статистики, профильные интернет-ресурсы, публикации по конструкторским и техническим решениям.

**Результаты.** Сформирован перечень показателей, характеризующих эксплуатационные возможности РТК, выбраны наиболее значимые. Определена группа параметров, реализация которых на проектируемом РТК позволит осуществить укладку блоков в идеальном случае. Получено техническое описание варианта строительного РТК, представлены оценки стоимостных и временных ресурсов для его создания.

**Выводы.** Показана формализация описаний строительного РТК в процессе выработки концептуального технического решения, а также возможность на этапе постановки задачи (предпроектные исследования) получения достоверных оценок вероятных затрат по стоимости и по времени на создание РТК, что важно для оценки реализуемости соответствующего инвестиционного процесса (бизнес-плана) и принятия решения по открытию проектных работ.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** строительный робототехнический комплекс, укладка блоков, экспертиза, экспертные оценки, оценка стоимости разработки, принятие решения

*Благодарности.* Авторы выражают глубокую признательность начальнику отдела НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана Александру Юрьевичу Малыхину за помощь при подготовке статьи.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Лагута В.С., Калинин С.В., Кузнецов В.Э. Оценка возможности и целесообразности создания строительного РТК укладки газобетонных блоков // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 10. С. 1450–1460. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1450-1460

## Development of a construction robotic system designated for aircrete block laying: feasibility and expediency assessment

Viktor S. Laguta<sup>1</sup>, Sergei V. Kalinichenko<sup>2</sup>, Vladimir E. Kuznecov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Industrial Researches; Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University (BMSTU); Moscow, Russian Federation;

<sup>3</sup> GRAS ZHILSTROY; Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Development of construction technologies and materials entails the use of larger and heavier aircrete blocks. Hence, it promotes construction industry automation through the use of robotic systems. Due to considerable costs of development, production and operation of robotic systems capable of substituting human workers at a construction site, thorough substantiation of their efficiency (or investment appeal) is required. It encompasses the calculation of total costs and the timing of its development and implementation, since no universal comprehensive solutions are available now.

**Materials and methods.** The co-authors have summarized practical design and engineering problems that may accompany the development of novel machinery and preparation of investment projects towards development of a construction robotic system (CRS) designated for aircrete block laying in the course of construction of buildings and structures. Two groups of experts were involved, Group One had civil engineers and Group Two had designers of robotic and mechatronic systems. Methods of expert evaluations and mathematical statistics were used; the co-authors also addressed specialized Internet websites and publications on design and engineering solutions.

**Results.** A list of criteria describing the performance of a robotic system was made with a focus on most important factors. The co-authors identified a set of parameters whose availability in a robotic system ensures ideal blockwork. The co-authors have developed a technical specification for a robotic system, identified its cost and developed an implementation schedule.

**Conclusions.** A formalized description of the future CRS, designated for construction purposes, is provided for the period of concept development. The co-authors also provided a reliable assessment of potential costs and schedules at the problem statement stage (a feasibility study), as it is important for the assessment of implementability of investment processes (a business plan) in terms of making a decision to initiate project implementation.

**KEYWORDS:** robotic construction system, block laying, expert examination, expert estimates, development cost assessment, decision making

**Acknowledgements.** The co-authors express their deep gratitude to Dr. Alexander Malykhin, Director, Department of the Research and Educational Centre for Robotics at the Bauman Moscow State Technical University for his kind assistance in drafting this manuscript.

**FOR CITATION:** Laguta V.S., Kalinichenko S.V., Kuznecov V.E. Development of a construction robotic system designated for aircrete block laying: feasibility and expediency assessment. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(10):1450-1460. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1450-1460 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

Роботизация в строительной отрасли — одно из направлений повышения эффективности и качества работ. Исследования и разработки в этом направлении ведутся уже несколько десятилетий во многих странах мира [1–3]; созданная в 1990 г. Международная ассоциация по автоматизации и робототехнике в строительстве (IAARC) проводит ежегодные симпозиумы, на которых обсуждаются различные научные и технические аспекты строительных роботов [4–8], их подсистемы [9–11], перспективы и тенденции их развития [12].

Интерес к созданию робототехнических систем для автоматизации строительных операций растет и в России, доказательством чему могут служить последние научные публикации по данной теме [13–20].

Основная проблема, связанная с предполагаемым внедрением новой техники, — выбор направления решения технической задачи. Современное состояние развития систем автоматизации и робототехники предполагает широкий спектр технических решений как в готовом виде («под ключ»), так и в виде автономных подсистем («полуфабрикаты»). Однако это не снижает ответственности за принятие решения о начале проектных работ, поскольку создание (внедрение) сложных систем потребует привлечения высококлассных специалистов и/или инженеринговых компаний. А стоимость проектных, опытно-конструкторских работ (ОКР) в этой области существенно превышает стоимость разрабатываемого «железа».

Неопределенность ситуации максимальна в «начале пути», отсюда и желание (вернее, необходимость) хотя бы ориентировочно оценить объем предстоящих затрат и длительность проектных работ. Практически единственный вариант формализации

такого рода проблем и поэтапного снижения неопределенности постановки задачи для проектировщиков (если речь идет о новой технике) — проведение этапных экспертиз. На практике подобные методики практически не используются из-за сложности предлагаемых процедур определения вариантов технических решений и способов получения критериальных оценок. По этим же причинам в качестве объектов рассматриваются, как правило, хорошо отработанные варианты технических решений для серийной продукции, имеющей достаточно длительную «историю» эксплуатации, например, гидравлические системы [21].

Задача, которую поставили перед собой авторы, — показать на практическом примере строительного роботизированного технологического комплекса (РТК) укладки газобетонных блоков (ГБ), как провести анализ и получить количественную информацию для принятия решения о начале проектных работ по созданию новой техники. В статье изложены результаты экспертных исследований постановки проектной задачи и приведены оценки требуемых ресурсов по осуществлению проекта в целом. Отметим, что при общем положительном решении заказчика об открытии работ на основании результатов подобных исследований формируется концепция проектного решения, т.е. технический облик РТК.

Предлагаемая методика включает следующие этапы:

1. Подготовительный — формирование ограничений, связанных с объектом роботизации и возможностями организации-заказчика по осуществлению проектных и опытно-конструкторских работ. На подготовительном этапе также формируется перечень показателей, характеризующих эксплуатационные возможности РТК при проведении экспертизы.

2. Ранжирование показателей по значимости.
3. Формирование списка параметров, реализация которых на проектируемом РТК позволит осуществить укладку ГБ в идеальном случае.
4. Ранжирование параметров РТК по степени влияния на выбранный на предыдущем этапе наиболее значимый показатель или группу наиболее значимых показателей.
5. Формирование «прообраза» планируемого к созданию РТК.
6. Формирование прогностических оценок временных рамок и стоимости планируемого к разработке РТК на основе информационного анализа состояния рынка поставщиков робототехнических систем и/или отдельных средств автоматизации.

Рассмотрим указанные этапы подробнее.

#### **Первый этап — подготовительный**

Поскольку предполагается при строительстве различных объектов заменить ручную кладку ГБ на роботизированную, то на основании общего описания предполагаемых работ необходимо сформулировать перечень показателей, характеризующих применение РТК. Предварительно выделим особенности использования ГБ в строительстве:

- для эффективного применения ГБ желательно использовать блоки максимально возможных габаритов. Это делает проблемным ручную укладку, так как вес крупногабаритных блоков (например, марок D600 или D700) может превышать 60 кг;
- наличие высоких требований по качеству кладки — толщина шва, величина допустимых перекосов, целостность ГБ и т.п., т.е. то, что определит прочность строительной конструкции, будущие теплопотери, расположение и геометрию «стенки» для последующих работ по внутренней отделке.

В качестве дополнительных ограничений, конкретизирующих задачу создания СРТК укладки ГБ, выступают требования для гражданского строительства многоэтажных зданий и, в частности, функционирование в ограниченном пространстве по высоте (расстояние между перекрытиями от 2,7 до 4,0 м).

Под показателями РТК будем понимать качественные и количественные характеристики применения комплекса в процессе укладки ГБ. Например, с точки зрения процесса разработки строительного РТК можно выделить показатели, характеризующие ограничения по его применению, такие как «максимальный вес ГБ» или «точность укладки ГБ». Очевидно, что эти характеристики войдут в ТЗ на разработку РТК в качестве безусловных требований. «Масса — габаритные данные РТК» также войдут в ТЗ, но в качестве ограничений на выбираемые технические решения. Еще часть характеристик представляют параметры строительного РТК, которые обеспечивают задаваемые при проектировании функциональные возможности комплекса. Например, «наличие дополнительных функциональных

возможностей РТК — подрезка блоков до нужного размера» или «штрабление пазов» и др. Интегральные характеристики функционирования РТК, например «стоимость приобретения и монтажа, рублей» и др.

В представляемой методике для оценки возможного технического решения комплекса необходимо подобрать такие показатели, которые будут характеризовать технический процесс укладки ГБ в целом. Причем такие показатели должны отражать интегральное влияние отдельных компонент роботизированного комплекса на его функциональные возможности.

По мнению авторов, в этот перечень входят:

1. Возможность укладки ГБ в различных направлениях, в том числе круговая кладка.
2. Возможность укладки нестандартных элементов, таких как арматура, П-образные и О-образные блоки и др.
3. Возможность только линейной кладки ГБ (в вертикальном и горизонтальном направлении).
4. Время монтажа/демонтажа конструкции РТК, час.
5. Возможность только линейной кладки ГБ (в вертикальном и горизонтальном направлении), в том числе с формированием проемов и углов.
6. Площадь кладки ГБ с одного монтажа РТК, м<sup>2</sup>.
7. Степень автоматизации вспомогательных процессов для работы РТК.
8. Скорость кладки, шт./час.

Отсутствие в перечне традиционных экономических показателей, таких как стоимость приобретения и монтажа, не случайно. На предпроектной стадии, когда проблема только формулируется и варианты возможных решений достаточно «туманны», говорить о стоимости будущего РТК можно лишь условно — оценка затрат будущего проекта и является целью реализации описываемой методики, а анализируемые показатели и параметры должны стать «инструментом» получения такой оценки.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

### **Второй этап — ранжирование показателей по значимости**

Рекомендуемое количество одновременно выносимых на экспертизу факторов, как правило, определяется квалификацией и количеством участвующих экспертов. Для проведения экспертизы показателей выбран метод парных сравнений [22]. В качестве экспертов в количестве шести специалистов выступили сотрудники предприятий, занимающихся строительством с широким использованием ГБ и располагающих требуемым опытом организации и управления строительными работами.

Результаты проведенной экспертизы представлены в табл. 1, где  $M = 6$  — количество экспертов;  $N = 8$  — количество анализируемых факторов.

**Табл. 1.** Общая ранжировка по показателям РТК укладки ГБ (количество экспертов — 6)**Table 1.** General breakdown by CRS performance in terms of block laying (number of experts: 6)

N / M	Э1 / E1	Э2 / E2	Э3 / E3	Э4 / E4	Э5 / E5	Э6 / E6	Сумма / Total	Ранг / Position
1	3,00	4,20	3,50	3,30	2,00	1,70	17,7	6
2	2,40	2,30	2,90	2,10	2,00	1,70	13,4	8
3	2,30	2,80	3,20	3,10	2,00	2,90	16,3	7
4	4,30	4,40	4,70	4,40	6,00	2,90	26,7	1
5	4,40	4,10	3,60	4,10	2,00	5,10	23,3	4
6	4,20	3,00	2,00	3,70	6,00	5,10	24,0	3
7	2,70	2,70	3,00	3,50	6,00	2,90	20,8	5
8	4,70	4,50	5,10	3,80	2,00	5,70	25,8	2

*Примечание.* Коэффициент согласованности мнений экспертов (коэффициент конкордации) равен 0,53.

Величина доверительной вероятности — 95 %.

*Note.* Consistency of expert opinions (coefficient of concordance) equals to 0.53. Confidence probability — 95 %.

Вывод по результатам проведенной экспертизы: недоминируемый показатель — «Время монтажа/демонтажа конструкции РТК, час». Однако близкие значения рангов для факторов № 4, 6, 8 позволяют говорить о группе наиболее значимых показателей, в том числе «Площадь кладки ГБ с одного монтажа РТК, м<sup>2</sup>» и «Скорость кладки, шт./час».

### Третий этап — ранжирование параметров РТК

Под «параметрами РТК» будем понимать как подсистемы комплекса (в том числе технические, программные управления, вспомогательные и др.), так и его отдельные элементы, реализующие определенные функциональные возможности. Список параметров РТК, выносимых на экспертизу в идеальном случае, охватывает все множество возможных технических решений, которые позволяют осуществить планируемую работу в идеальном случае, т.е. в отсутствии каких-либо конструкторских ограничений. Однако для этапа предпроектных исследований достаточно сложных РТК трудно ожидать получения точной информации, тем более в области инновационных разработок, каковым является РТК укладки ГБ. Поэтому необходимо сгруппировать совокупность параметров таким образом, чтобы эксперты могли однозначно связать анализируемые параметры с эффектом влияния на группу наиболее значимых показателей РТК.

В нашем случае предыдущий этап методики позволил выявить в том числе, основное желательное направление технической реализации РТК — возможность только линейной кладки ГБ (в вертикальном и горизонтальном направлениях), в том числе с формированием проемов и углов. Рассмотрим принципиальную схему функционирования РТК на площадке укладки ГБ (рис. 1). ГБ должны быть уложены по заданному периметру на заданную высоту. Это — зона глобальной системы координат

(ГСК). В этих координатах РТК осуществляет горизонтальное перемещение и позиционирование комплекса для последующего нанесения клея и укладки ГБ по вертикали (рис. 1). Манипулирование ГБ осуществляется в региональной системе координат (РСК). Здесь осуществляются следующие действия:

- извлечение ГБ из магазина;
- перемещение в зону нанесения клея;
- перемещение в рабочую зону кладки ГБ;
- вертикальное и горизонтальное перемещение в РСК.

В рабочей зоне (РЗ) комплексом проводятся действия (рис. 1):

- позиционирование ГБ с заданной точностью;
- прижим и установка ГБ в ряд.

В результате проведенного анализа принципиально возможных решений по роботизации, которые могут быть использованы (хотя бы в какой-то части) для процесса укладки ГБ [13, 14, 17], предложена группировка возможных вариантов реализации РТК, которая представлена в табл. 2. Необходимо отметить, что в общем случае дополнительно могут быть рассмотрены и включены в анализ специализированные системы обеспечения функционирования РТК, т.е. дополнительные параметры, например для «полевых условий» применения или для объектов специального назначения (оборонительные сооружения и т.п.).

Ранее мы получили группу наиболее значимых показателей. Поэтому для экспертов третьего этапа можно задать направление оценки влияния анализируемых параметров РТК, а именно:

- «Время монтажа/демонтажа конструкции РТК, час» — *минимум*;
- «Площадь кладки ГБ с одного монтажа РТК, м<sup>2</sup>» — *максимум*;
- «Скорость кладки, шт./час» — *максимум*.

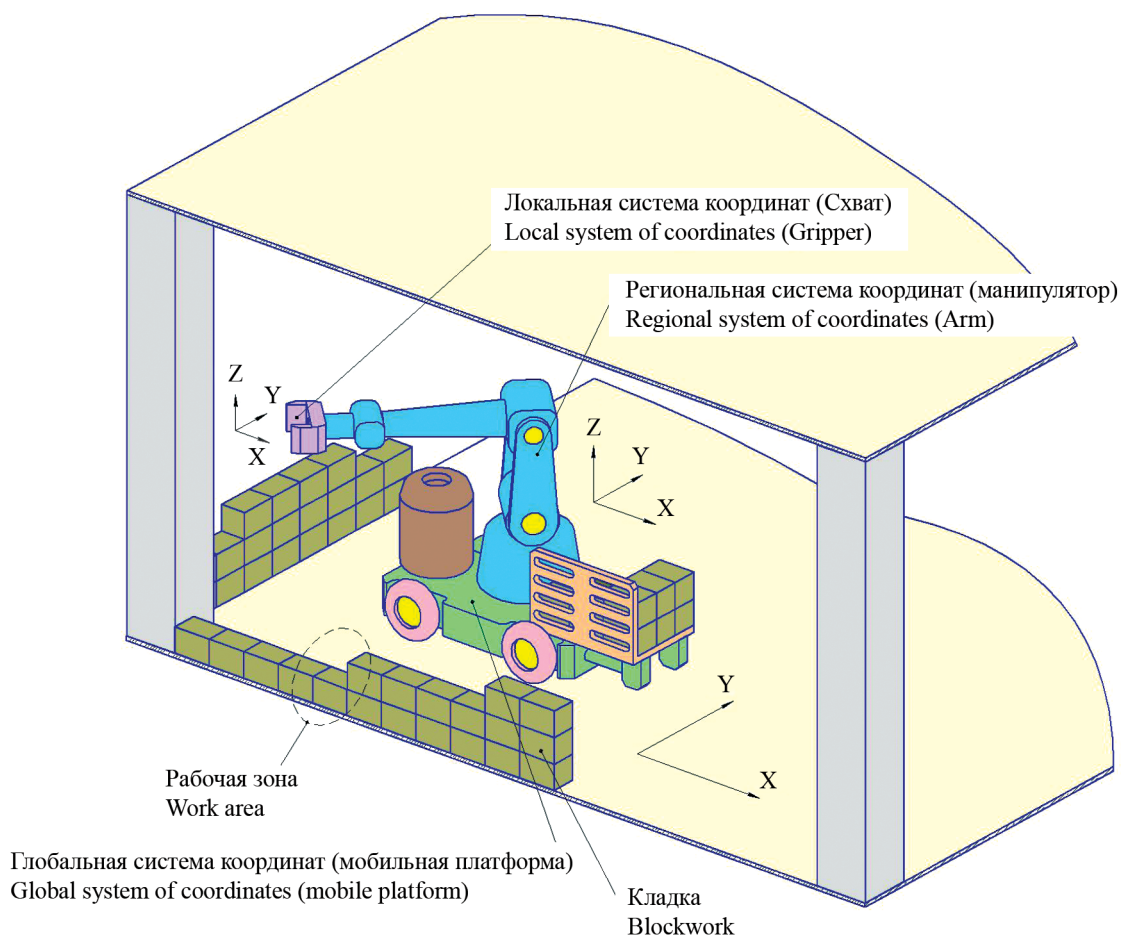


Рис. 1. Схема функционирования РТК на площадке укладки ГБ

Fig. 1. CRS functional diagram describing aircrete block laying on the construction site

Табл. 2. Группировка параметров РТК для проведения экспертизы

Table 2. CRS parameter clustering for an expert examination

Наименование фактора Factor name	Варианты исполнения Design options	Вес в баллах, среднее (min/max) Value in points, average (min/max)		
Система перемещения РТК в глобальной системе координат CRS travel system in the global system of coordinates	1.1. Колесная с предустановленными направляющими Wheel system on pre-installed guide rails	<b>0,43 (0,1/0,7)</b>		
	1.2. На колесном шасси / Wheel chassis	0,32 (0,1/0,8)		
	1.3. На гусеничном шасси / Crawler chassis	0,25 (0,0/0,6)		
Система ориентации Orientation system <b>ГСК</b> — в глобальной системе к-т; In the global system of coordinates <b>РСК</b> — в региональной системе к-т; In the regional system of coordinates <b>РЗ</b> — в рабочей зоне In the work area (WA)		<b>ГСК</b> GCS	<b>РСК</b> RCS	<b>РЗ</b> WA
	1.1. Спутниковая навигация / Satellite navigation	0,18	0,09	0,02
	1.2. Геодезическая привязка / Geodetic connection	<b>0,34</b>	0,10	0,02
	1.3. На основе лазерных дальнометров By means of laser scanners	0,21	0,19	0,10
	1.4. На основе систем технического зрения By means of machine vision systems	0,12	0,21	0,12
	1.5. На основе датчиков скорости и положения By means of speed and position sensors	0,08	<b>0,31</b>	0,26
	1.6. На основе датчиков наличия контакта By means of touch sensors	0,05	0,10	<b>0,48</b>

Окончание табл. 2

Наименование фактора Factor name	Варианты исполнения Design options	Вес в баллах, среднее (min/max) Value in points, average (min/max)		
		ГСК GCS	РСК RCS	РЗ WA
Приводы системы позиционирования Drives of the positioning system ГСК — в глобальной системе к-т; In the global system of coordinates (GSC) РСК — в региональной системе к-т; In the regional system of coordinates (RSC); РЗ — в рабочей зоне In the work area (WA)	1.1. Электрический / Electric	<b>0,80</b>	<b>0,62</b>	<b>0,58</b>
	1.2. Гидравлический / Hydraulic	0,14	0,20	0,18
	1.3. Пневматический / Pneumatic	0,03	0,03	0,10
	1.4. Беспроводная (механическая) Mechanical (drive-free)	0,03	0,15	0,14
Приводы системы захвата Gripper drives	1.1. Электрический / Electric	<b>0,52</b>	<b>(0,3/0,8)</b>	
	1.2. Гидравлический / Hydraulic	0,23	(0,0/0,4)	
	1.3 Пневматический / Pneumatic	0,25	(0,0/0,6)	
Локальный склад блоков Local warehouse of blocks	1.1. Магазин на РТК On-board CRS block storage	<b>0,43</b>	<b>(0,0/0,7)</b>	
	1.2. Независимый склад-накопитель Standalone block storage	0,40	(0,1/0,8)	
	1.3. Перегрузка оператором с поддона Reloading by an operator from a pallet	0,17	(0,0/0,4)	
Тип системы управления РТК CRS control system type	1.1. Автоматическое / Automatic control	<b>0,28</b>	<b>(0,0/0,5)</b>	
	1.2. Ручное / Manual control	0,18	(0,0/0,4)	
	1.3. Коллаборативное / Collaborative control	0,2	(0,0/0,7)	

Для проведения экспертизы этого этапа использован метод балльных оценок [22]. В качестве экспертов в исследовании приняли участие сотрудники МГТУ им. Н.Э. Баумана, занимающиеся проектированием и изготовлением автоматизированного оборудования и робототехники — НУЦ «Робототехника», кафедр робототехнические системы и мехатроника и компьютерные системы автоматизации производств.

В табл. 2 указан средний (по всем экспертам) вес в баллах для анализируемых факторов, а также минимальное и максимальное значения из полученных экспертных оценок.

На следующем, **четвертом этапе**, полученные весовые коэффициенты факторов позволяют «описать» ориентировочный облик («прообраз») рассматриваемого РТК. В нашем случае — это техническая система в составе:

- «Система перемещения РТК в глобальной системе координат» — колесная с предустановленными направляющими;
- «Система ориентации в глобальной системе координат» — на основе геодезической привязки;
- «Система ориентации в региональной системе координат» — на основе датчиков скорости и положения;
- «Система ориентации в рабочей зоне» — на основе датчиков наличия контакта;
- Приводы в РТК — электрические;
- Локальный склад ГБ организуется непосредственно на РТК — «магазин на РТК»;
- «Управление РТК» — автоматическое.

Анализ полученных результатов экспертизы параметров РТК показал определенную взаимосвязь выбранных экспертами вариантов технических решений. Действительно, для монтажа направляющих в РТК укладки ГБ необходимо «определить положение закрепленных на местности точек, зданий и сооружений и их элементов в принятых системах координат и высот» (СП 11-104-97 «Инженерно-геодезические изыскания для строительства»), т.е. в нашем случае осуществить геодезическую привязку в каждой точке позиционирования РТК в глобальной системе координат. Это же решение позволяет наиболее эффективно использовать построение системы ориентации в РСК на основе датчиков скорости и положения, поскольку движение осуществляется в «фиксированной» координате ГСК и конструктивная жесткость РТК на направляющих достаточна для их использования. Ожидаемым оказался выбор экспертов в пользу единого принципа движения в системе, в нашем случае — на основе электроприводов. Решение по автоматическому принципу управления РТК (без участия человека), возможно, продиктовано соображениями техники безопасности для предполагаемых условий «непрерывной» эксплуатации.

Следующий этап — **пятый** — информационный анализ состояния рынка поставщиков робототехнических систем, отдельных модулей и систем автоматизации, хотя бы частично включающих выбранные параметры РТК. Технически это реализуется анализом практического опыта создания робототехни-

ческих систем привлеченными ранее экспертами; справочной информации, доступной в интернете (см. выше); технической и экономической документацией, полученной из официальных источников, в том числе по запросам соответствующих коммерческих предложений. Эта информация может быть, в принципе, подготовлена параллельно второму и третьему этапам реализации рассматриваемой методики. Однако необходимо иметь в виду, что полученные экспертные оценки показателей и параметров РТК могут оказаться полезными для сокращения пространства информационного поиска.

Для оценки стоимости разрабатываемого РТК используем направление автоматизации процесса укладки ГБ, а именно:

- сначала перемещение в глобальной системе координат, в нашем случае — это движение по направляющим и фиксация в конечном положении для начала движения в региональной системе координат;
- затем перемещение в региональной системе координат до точки выдачи ГБ для нанесения клея и укладки в заданной точке возводимой стенки;
- наконец, осуществление «финишных» манипуляций с ГБ в рабочей зоне и перемещение в начальное положение РСК.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве технического аналога для перемещения в ГСК возможно конструктивное решение, реализованное в автоматизированном устройстве для кладки кирпичей Motor Mason<sup>1</sup>. Отметим, что речь идет только о схематическом решении, поскольку вариант-аналог представляет механизированную конструкцию. С учетом оснащения системой электроприводов и информационного оборудования (см. табл. 2) стоимостная оценка подобного

<sup>1</sup> Роботизация: Стройплощадка будущего: эволюция роботов-каменщиков. URL: <http://robotrends.ru/pub/1947/robotizaciya-stroyploshadka-budushhego-evolyuciya-robotov-kamenshikov>

решения составит ориентировочно около 3 млн руб. Прогнозное значение затрат на проектирование и апробацию — около 5 млн руб., период создания опытного образца — около полугода (табл. 3).

В качестве технического аналога перемещения в РСК выбран вариант электромеханического подъемного механизма с цепным приводом<sup>2</sup>. Проведенная аналогичным образом оценка адаптированной для РСК укладки ГБ составляет около 10 млн руб., в том числе порядка 8 млн на проектирование и апробацию, и порядка шести месяцев на проведение проектных работ (табл. 3).

И, наконец, осуществление финишных манипуляций с ГБ в РЗ укладки. Здесь рассмотрена комбинация ранее рассмотренных технических решений и работа — укладчика кирпичей SAM-100<sup>3</sup>. Проведенная аналогичным образом оценка адаптированного решения с учетом оснащения соответствующим информационным оборудованием составит около 7 млн руб., в том числе порядка 4,5 млн на проектирование и апробацию, и около трех месяцев на проведение проектных работ (табл. 3).

Необходимо отметить, что длительность рассмотренных работ включает также «затраты» на заказ, изготовление и поставку деталей и комплектующих РТК. И хотя многие работы могут выполняться параллельно, практический опыт позволяет условно выделить определенную «последовательность» в общем проекте, поскольку подсистемы РТК технически взаимосвязаны и не могут разрабатываться совершенно независимо. Это предположение и позволяет условно выделить «чистое время» для создания соответствующей подсистемы РТК (см. табл. 3).

Таким образом, «накопленная» прогностическая оценка по стоимости РТК укладки ГБ составит около 29 млн руб. и не менее полутора лет проектных и опытно-конструкторских работ. Кроме этого, необходимо предусмотреть затраты на разработку

<sup>2</sup> Linde Material Handling. URL: <http://linde-mh.ru>

<sup>3</sup> Робот-каменщик SAM100 кладет кирпичи в 6 раз быстрее обычного рабочего. URL: <https://bespilot.com/news/739-sam-bricks-robot>

**Табл. 3.** Стоимость и продолжительность создания РТК укладки газобетонных блоков

**Table 3.** Development of a construction robotic system designated for aircrete block laying: cost and time frame

Стоимость и продолжительность работ Costs and time frame	ГСК GSC	РСК CRS	РЗ WA	Сборка, отладка, испытания Assembly, finetuning, testing	Итого Total
Комплектующие и изготавливаемые узлы, млн руб. Components and manufacturable assemblies, millions rub.	3,00	2,20	2,40	1,0	8,60 млн руб. millions rub.
Стоимость выполнения проектных работ, млн руб. Cost of design, millions rub.	5,00	8,00	4,50	3,0	20,50 млн руб. millions rub.
Длительность проектных работ, мес. Design time frame, months	6	6	3	2	17 мес. months

и создание вспомогательного оборудования и оборудования интеграции модулей в составе РТК, в том числе систем управления и обеспечения функционирования. А это еще порядка 5 млн руб., что увеличивает общую оценку примерно до 34 млн руб. Для справки — по оценкам зарубежных авторов для реализации подобного проекта потребуется не менее 2,0 млн долларов<sup>4</sup>.

## ВЫВОДЫ

Для внедрения инновационных методов выполнения строительных работ, особенно в индустриальном строительстве, созданы необходимые предпосылки. По данным авторитетного издания Transparency market Research (2019 г.), среднегодовой рост на рынке строительной робототехники составит порядка 10 % в период с 2018 по 2026 гг., т.е. объем рынка за эти годы увеличится более чем в два раза<sup>5</sup>.

Если бы не существовало системы реальных ограничений и располагаемые ресурсы заказчика работ (финансы и время) были также не ограничены, в нашем случае в ТЗ на проектирование РТК вошли бы все возможные пожелания, и в публикуемой статье не было бы практического смысла. В реальной же ситуации заказчику придется осуществлять выбор из тех параметров, которые возможны к реализации на разрабатываемом РТК, с учетом располагаемых ресурсов для проектирования, изготовления, монтажа и т.п. Или обоснованно отказаться от проведения проектных работ по полученным данным. Изложенный подход позволяет вовремя отсекал «прожектёрские планы» с одной стороны, а с другой, всерьез и, возможно, надолго начинать перспективные разработки в создании новой техники и технологий. Заметим, что в каждом случае как список показателей, так и список параметров конкретного РТК будут индивидуальны. Однако методический подход останется тем же, что, как надеются авторы, и будет представлять интерес для читателя.

<sup>4</sup> Hadrian. URL: <http://robotrends.ru/robopedia/hadrian>

<sup>5</sup> Робототехника: Tractica — рынок строительных роботов стремительно растёт. URL: <https://robonews.su/22722-Robototekhnika-Tractisa-rynok-stroitel-nyh-robotov-stremitelno-rastet.html>

Используя изложенную методику, удалось связать ранжированный ряд параметров РТК с прогностической оценкой стоимости его разработки, включая системы управления и обеспечения функционирования, а также оценить стоимость и длительность проектных работ (табл. 3).

С учетом практического опыта разработки инновационного оборудования очевидно, что оценки такого рода являются «оценкой снизу». Реальные затраты потенциального инвестора будут выше, в том числе за счет стоимости привлечения финансирования, возможных накладных расходов, дополнительной налоговой нагрузки. Именно полученная количественная информация о базовых затратах на создание РТК на начальной стадии даст возможность более корректно просчитать экономику инвестиционного проекта в целом.

На основании проведенных в процессе реализации методики исследований удастся повысить, в том числе, вероятность успешной технической реализации проекта, поскольку полученные результаты позволяют сформулировать более корректное (с точки зрения возможности реализации) ТЗ на разработку.

В результате проведенных экспертиз и исследований на стол лиц, принимающих решение (ЛПР), «легли» обоснованные материалы, количественно представляющие будущий проект «в первом приближении». А это, в свою очередь, позволило соотнести планируемые финансовые возможности и перспективы с оценкой предполагаемых затрат. Анализ показал, что «в одиночку» даже крупной строительной компании не по силам осуществить разработку и ввод в эксплуатацию рассмотренного строительного РТК. Это подтверждает практический опыт создания робототехнических систем, замещающих относительно дешевый труд наемного работника низкой квалификации. Однако развитие технического прогресса не остановить — рано или поздно малоквалифицированный труд будет роботизирован. Об этом говорит практика создания и появление на рынке соответствующих РТК, в том числе и в области строительства. Сейчас для этого существуют рыночные механизмы создания дорогостоящих перспективных технических систем, таких как кооперация, частно-государственное партнерство, фонды развития промышленности, инжиниринговые центры и др. Дело «за малым» — за формированием благоприятной экономической среды для создания и внедрения подобных инноваций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Загороднюк В.Т., Паршин Д.Я. Строительная робототехника. М.: Стройиздат, 1990. 271 с.
2. Okazaki H. Current Development and Issues in Construction Robot Technology // Proceedings of the 13th

- International Symposium on Automation and Robotics in Construction. 1996. DOI: 10.22260/ISARC1996/0002
3. Zavadskas E.K. Automation and robotics in construction: International research and achievements //



Automation in Construction. 2010. Vol. 19. Issue 3. Pp. 286–290. DOI: 10.1016/j.autcon.2009.12.011

4. *Cai S., Ma Z., Skibniewski M., Guo J., Yun L.* Application of automation and robotics technology in high-rise building construction: An Overview // Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). 2018. DOI: 10.22260/ISARC2018/0044

5. *Asadi K., Ramshankar H., Pullagurla H., Bhandare A., Shanbhag S., Mehta P. et al.* Building an integrated mobile robotic system for real-time applications in construction // Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). 2018. DOI: 10.22260/ISARC2018/0063

6. *Wu K., Garcia de Soto B., Adey B.T., Zhang F.* Automatic generation of the vertical transportation demands during the construction of high-rise buildings using BIM // Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). 2019. DOI: 10.22260/ISARC2019/0014

7. *Vukorep I.* Autonomous big-scale additive manufacturing using cable-driven robots // Proceedings of the 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). 2017. DOI: 10.22260/ISARC2017/0034

8. *Krieg O.D., Lang O.* Adaptive automation strategies for robotic prefabrication of parametrized mass timber building components // Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). 2019. DOI: 10.22260/ISARC2019/0070

9. *Kerber E., Heimig T., Stumm S., Oster L., Brell-Cokcan S., Reisgen U.* Towards robotic fabrication in joining of steel // Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). 2018. DOI: 10.22260/ISARC2018/0062

10. *Xu S., Wang J., Wang X., Shou W.* Computer vision techniques in construction, operation and maintenance phases of civil assets: A critical review // Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). 2019. DOI: 10.22260/ISARC2019/0090

11. *Wen M.-C., Yang C.-H., Chen Y., Sung E.-X., Kang S.-C.* A stereo vision-based support system for tele-operation of unmanned vehicle // Proceedings of the 32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2015). 2015. DOI: 10.22260/ISARC2015/0071

12. *Gharbia M., Yan Chang-Richards A., Zhong R.* Robotic technologies in concrete building construction: a systematic review // Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). 2019. DOI: 10.22260/ISARC2019/0002

13. *Grigorian E.A., Surovenko V.B., Semenova M.D., Kormalova K.D.* Automated masonry method with evaluation of its productivity and quality characteristics // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2019. № 3 (78). С. 7–22. DOI: 10.18720/CUBS.78.1

14. *Шмелёва Е.В.* Современные технологии в строительстве: роботизированная кладка кирпича // Серия «Строительство»: сб. статей магистрантов и аспирантов: в 2-х т. СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. С. 366–373.

15. *Шагина Е.С.* Роботизация как метод повышения безопасности строительного производства // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 6 (21). С. 128–147.

16. *Булгаков А.Г., Гернер И., Каден Р.* Исследования и практические примеры организации производства и использования роботов в стройиндустрии. М.: ВНИИТПИ, 2008. Вып. 1. 48 с.

17. *Целищев О.В., Мунасыпов Р.А.* Автоматизация процесса кирпичной кладки // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 1. С. 56–61.

18. *Короед П.С., Широков Л.А.* Повышение эффективности строительно-монтажных работ на базе внедрения роботизированных систем манипулирования // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2016. № 3 (119). С. 168–171.

19. *Вильман Ю.А.* Прогресс в строительстве при возведении многоэтажных жилых зданий системы «Юникон» тормозится затратами ручного труда // Успехи Современной Науки. 2017. Т. 2. № 6. С. 35–38.

20. *Королева К.Е., Вахрушев С.И.* Повышение производительности каменной кладки // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2020. Т. 2. С. 425–431.

21. *Аверченков А.В., Орехов Д.В.* Выбор оптимальной конструкции гидравлической станции с помощью морфологических методов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20. № 12 (119). С. 80–90. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-12-80-90

22. *Литвак Б.Г.* Экспертная информация. Методы получения и анализа. М.: Радио и связь, 1982. 184 с.

Поступила в редакцию 11 июля 2020 г.

Принята в доработанном виде 9 сентября 2020 г.

Одобрена для публикации 30 октября 2020 г.

**ОБ АВТОРАХ:** **Виктор Степанович Лагута** — кандидат технических наук, генеральный директор; **Институт производственных исследований**; 107014, г. Москва, ул. Гастелло, д. 44, стр. 4; РИНЦ ID: 545576; institut@imail.ru;

**Сергей Владимирович Калинин** — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры робототехнических систем и мехатроники; **Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана)**; 105005, г. Москва, Госпитальный пер, д. 10; РИНЦ ID: 935362; kalinichenkosv@bmsu.ru;

**Владимир Эдуардович Кузнецов** — кандидат технических наук, генеральный директор; **ГРАС ЖИЛСТРОЙ**; 115230, г. Москва, Каширское шоссе, д. 3, корп. 2/стр. 9; vkuznets13@yandex.ru.

## REFERENCES

1. Zagorodnyuk V.T., Parshin D.Ya. *Robotics in construction*. Moscow, Stroyizdat, 2006; 271. (rus.).
2. Okazaki H. Current development and issues in construction robot technology. *Proceedings of the 13th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. 1996. DOI: 10.22260/ISARC1996/0002
3. Zavadskas E.K. Automation and robotics in construction: International research and achievements. *Automation in Construction*. 2010; 19(3):286-290. DOI: 10.1016/j.autcon.2009.12.011
4. Cai S., Ma Z., Skibniewski M., Guo J., Yun L. Application of automation and robotics technology in high-rise building construction: An overview. *Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. 2018. DOI: 10.22260/ISARC2018/0044
5. Asadi K., Ramshankar H., Pullagurla H., Bhandare A., Shanbhag S., Mehta P. et al. Building an integrated mobile robotic system for real-time applications in construction. *Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. 2018. DOI: 10.22260/ISARC2018/0063
6. Wu K., Garcia de Soto B., Adey B.T., Zhang F. Automatic generation of the vertical transportation demands during the construction of high-rise buildings using BIM. *Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. 2019. DOI: 10.22260/ISARC2019/0014
7. Vukorep I. Autonomous big-scale additive manufacturing using cable-driven robots. *Proceedings of the 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. 2017. DOI: 10.22260/ISARC2017/0034
8. Krieg O.D., Lang O. Adaptive automation strategies for robotic prefabrication of parametrized mass timber building components. *Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. 2019. DOI: 10.22260/ISARC2019/0070
9. Kerber E., Heimig T., Stumm S., Oster L., Brell-Cokcan S., Reisgen U. Towards robotic fabrication in joining of steel. *Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. 2018. DOI: 10.22260/ISARC2018/0062
10. Xu S., Wang J., Wang X., Shou W. Computer vision techniques in construction, operation and maintenance phases of civil assets: A critical review. *Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. 2019. DOI: 10.22260/ISARC2019/0090
11. Wen M-C., Yang C-H., Chen Y., Sung E-X., Kang S-C. A Stereo Vision-based support system for tele-operation of unmanned vehicle. *Proceedings of the 32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2015)*. 2015. DOI: 10.22260/ISARC2015/0071
12. Gharbia M., Yan Chang-Richards A., Zhong R. Robotic technologies in concrete building construction: A systematic review. *Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. 2019. DOI: 10.22260/ISARC2019/0002
13. 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; 3(78):7-22. DOI: 10.18720/CUBS.78.1 (rus.).
14. Shmeleva E.V. Modern technologies in construction: Robotic brick laying. *Series "Construction": collection of articles of undergraduates and graduate students. In 2 volumes*. St. Petersburg, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2020; 366-373. (rus.).
15. Shagina E.S. Robotics as a method of improving the safety construction production. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014; 6(21):128-147. (rus.).
16. Bulgakov A.G., Gerner I., Kaden R. *Research and practical examples of the production organization and robots use in the construction industry*. Moscow, All-Russian State Scientific Research Institute for Problems of Scientific and Technological Progress and Information in Construction, 2008; 1:48. (rus.).
17. Tselishev O.V., Munasypov R.A. Brickling process automation. *Modern High Technologies*. 2014; 1:56-61. (rus.).

18. Koroed P.S., Shirokov L.A. Improving the efficiency of construction and installation works on the basis of the introduction of robotic manipulation systems. *Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture*. 2016; 3(119):168-171. (rus.).

19. Vilman Yu.A. Progress in construction in the construction of multi-storey residential buildings of the Unicon system is hampered by the cost of manual labor. *Success of Modern Science*. 2017; 2(6):35-38. (rus.).

20. Koroleva K.E., Vakhrushev S.I. Improving the performance of masonry. *Modern Technolo-*

*gies in Construction. Theory and Practice*. 2020; 2:425-431. (rus.).

21. Averchenkov A.V., Orekhov D.V. The choice of the optimal design of the hydraulic station using morphological methods. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 2016; 20(12):80-90. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-12-80-90 (rus.).

22. Litvak B.G. *Expert information. Methods of obtaining and analysis*. Moscow, Radio and communications, 1982; 184. (rus.).

*Received July 11, 2020*

*Adopted in revised form on September 9, 2020*

*Approved for publication on October 30, 2020.*

**BIONOTES:** **Viktor S. Laguta** — Candidate of Engineering Sciences, general director; **Institute of Industrial Researches**; build. 4, 44 Gastello st., Moscow, 107014, Russian Federation; ID RISC: 545576; institut@imail.ru;

**Sergei V. Kalinichenko** — Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of Department of Robotic Systems and Mechatronics; **Bauman Moscow State Technical University (BMSTU)**; 10 Hospital lane, Moscow, 105005, Russian Federation; ID RISC: 935362; kalinichenkosv@bmstu.ru;

**Vladimir E. Kuznecov** — Candidate of Engineering Sciences, general director; **GRAS ZHILSTROY**; housing 2/build. 9, 3 Kashirskoe highway, Moscow, 115230, Russian Federation; vkuznets13@yandex.ru.