

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-8-18

Славчева Г.С., Акулова И.И., Юров П.Ю.Воронежский государственный технический университет**E-mail: gslavcheva@yandex.ru*

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ 3D-ПРИНТЕРОВ

Аннотация. Предложена методика оценки конкурентоспособности строительных 3D-принтеров, базирующаяся на сопоставлении их технико-технологических характеристик и экономических параметров. В методике реализуется комплексный подход, обеспечивающий учет большого количества параметров сравнения, имеющих различную природу, на основе использования относительных показателей. При расчете учитываются конструктивные характеристики принтеров, характеристики технологичности процесса печати, характеристики напечатанных строительных объектов и экономические параметры принтеров. Для малоэтажного строительства существенными параметрами являются скорость печати, соотношение области печати и габаритных размеров принтера, возможность работы с низкотекучими смесями и с различными строительными смесями без переналадки, снижение дефектности печатного слоя и энергопотребления. Наиболее конкурентоспособным является принтер, который обеспечивает большее количество единиц полезного эффекта, определяемого набором технико-технологических характеристик, на единицу затрат, связанных с приобретением принтера, его энергопотреблением, трудоемкостью обслуживания и монтажа-демонтажа на стройплощадке. В результате оценки конкурентоспособности различных типов принтеров выявлено, что для малоэтажного строительства лидером является порталный принтер BOD2 2-2-2 датской компании «COBOD BOD2». Для печати строительных изделий и конструкций в производственных условиях конкурентными преимуществами обладает робот-манипулятор FIXED нидерландской компании «CyBe Construction». Рассмотренный подход к оценке конкурентоспособности строительных 3D-принтеров представляет практический интерес для их производителей. Полученное в результате реализации предложенной методики новое знание о значимости конструктивных решений 3D-принтеров создает стратегические ориентиры для отечественных производителей.

Ключевые слова: строительный 3D-принтер, конкурентоспособность, конструктивные особенности, экономические параметры.

Введение. Конкурентоспособность 3D-аддитивных строительных технологий по отношению к традиционным во многом определяется эффективностью технологических комплексов. Потенциально, роботизированное возведение строительных объектов методом 3D-печати предполагает отказ от сложной производственной инфраструктуры, сокращение затрат энергии, материалов и живого труда [1–3].

В настоящее время разработаны и активно продвигаются на рынок три типа принтеров [4–9].

1. *Принтер с порталной системой позиционирования* – представляет собой раму, по которой движется печатающее устройство (экструдер). Данный принтер производит печать объектов внутри системы перемещения, что закономерно приводит к увеличению габаритов принтера для масштабных строительных объектов (рис. 1).

2. *Робот-манипулятор* – перемещает экструдер при помощи «роботизированной руки», что позволяет устанавливать принтер как сна-

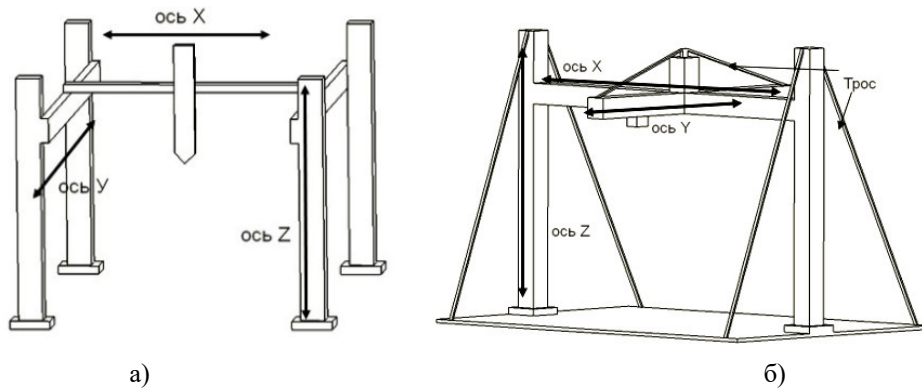
ружи, так и внутри печатного объекта. Характеризуется небольшими габаритами и весом, позволяющими достигать высокой мобильности принтера (рис. 2).

3. *Кабельная подвесная система* (дельта-принтер) – осуществляет трехмерное перемещение печатающей головки с помощью специальных тросс-кабелей внутри внешней рамы. Это определяет возможность печати высоких объектов, но с очень ограниченной площадью (рис. 3).

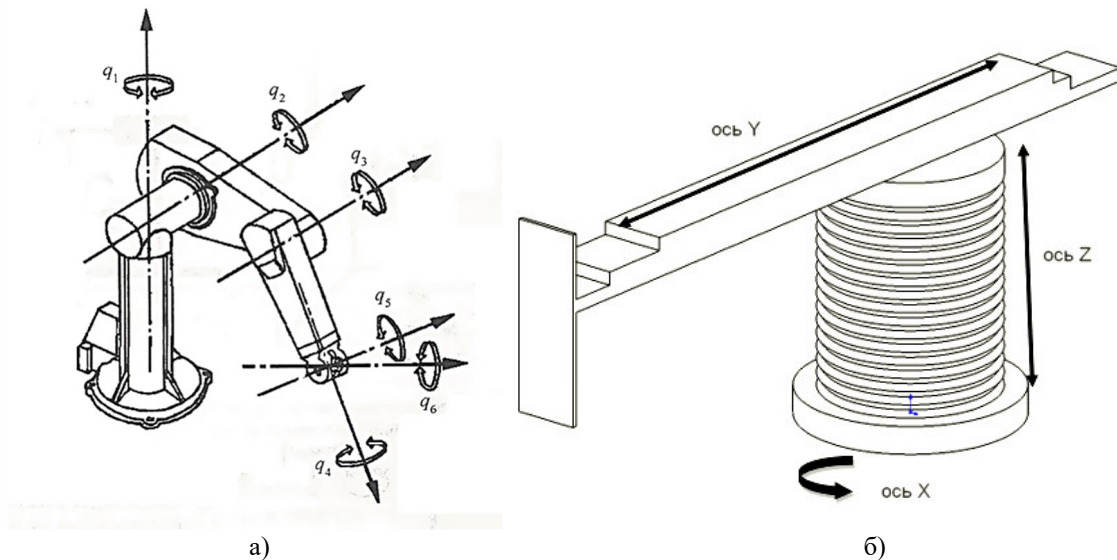
На сегодня сложилась ситуация, когда в практику строительства наиболее активно внедряются порталные 3D-принтеры. Данный выбор основан на сформировавшихся к настоящему моменту представлениях строительных компаний об относительной простоте, надежности и отсутствии сложностей в обслуживании используемой конструкции принтера. На наш взгляд, такой подход к выбору 3D-принтера является односторонним и недостаточно обоснованным, поскольку все виды принтеров обладают как достоинствами, так и недостатками, соотношение которых и определяет их конкурентоспособность на рынке [10, 11].

С учетом изложенного, целью настоящего исследования является разработка научно-обоснованной методики и комплексная оценка на ее

основе конкурентоспособности строительных 3D-принтеров.



а) б)
Рис. 1. Конструктивные схемы порталных 3D-принтеров
а) с четырехопорной системой перемещения,
б) с двухопорной системой перемещения¹



а) б)
Рис. 2. Конструктивные схемы роботов-манипуляторов:
а) 6-осевой робот², б) 3-осевой робот³

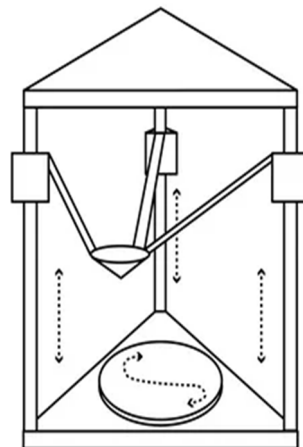


Рис. 3. Конструктивная схема кабельной подвесной системы (дельта-принтер)⁴

¹Источник: <https://t-magazine.ru/pages/3dprint-house/>

²Источник: <https://t-magazine.ru/pages/3dprint-house/>

³Источник: <https://studfile.net/preview/5693400/page:2/>

⁴Источник: <https://3dnews.ru/913338/samoe-interesnoe-na-kickstarter-dobavlyаем-plite-uma-i-slushаем-oblaka/?full>

Методы. Предлагаемая методика базируется на сопоставлении технико-технологических характеристик и экономических параметров строительных 3D-принтеров. Системность и комплексность при таком подходе обеспечиваются возможностью учета большого количества параметров сравнения, имеющих различную природу, на основе использования относительных показателей [12–16].

Алгоритм оценки конкурентоспособности строительных 3D-принтеров включает следующие шаги:

шаг 1 – формирование совокупности параметров оценки конкурентоспособности с определением их значимости;

шаг 2 – формирование базы сравнения и оценки конкурентоспособности принтеров;

шаг 3 – определение единичных (относительных) показателей конкурентоспособности для различных видов принтеров;

шаг 4 – расчет групповых индексов конкурентоспособности;

шаг 5 – расчет интегрального показателя конкурентоспособности по видам принтеров.

Отметим, что наиболее конкурентоспособным следует считать принтер, который обеспечивает *большее количество единиц полезного эффекта, определяемого набором технико-технологических характеристик, на единицу затрат, связанных с приобретением принтера, его энергопотреблением, трудоемкостью обслуживания и монтажа-демонтажа на стройплощадке* [12, 17, 18].

В результате формирования на основе системного анализа совокупности параметров оценки конкурентоспособности строительных 3D-принтеров (шаг 1) были выделены группы технико-технологических характеристик и экономических параметров. В первую группу вошли подгруппы параметров, отражающих конструктивные особенности принтеров, технологичность печати, качество и объем напечатанных строительных объектов. При этом каждая подгруппа имеет соответствующее логическое наполнение (табл. 1). Вторую группу составили показатели энергопотребления принтера, трудоемкости его монтажа-демонтажа на строительной площадке, трудоемкости обслуживания и цены.

Таблица 1

Совокупность параметров оценки конкурентоспособности строительных 3D-принтеров

Группа технико-технологических характеристик		
1. Подгруппа конструктивных характеристик	2. Подгруппа характеристик технологичности процесса печати	3. Подгруппа характеристик напечатанных строительных объектов
– площадь печати; – высота области печати; – точность позиционирования; – скорость печати; – площадь сечения печатного слоя; – соотношение области печати и габаритных размеров принтера	– возможность работы со смесями различного назначения (конструкционными, теплоизоляционными, отделочными) без переналадки; – возможность обеспечения роботизированной финишной отделки; – возможность работы с высоковязкими смесями, вязкость $\eta \sim 50\text{--}60$ Па·с	– качество печатного слоя (бездефектность); – качество поверхности объекта; – максимальная площадь объектов; – максимальная высота объектов
Группа экономических параметров		
– потребляемая мощность; – трудоемкость монтажа-демонтажа принтера;	– трудоемкость обслуживания (количество операторов); – цена принтера	

Оценку значимости выделенных характеристик и параметров рекомендуется проводить на основе эвристических методов путем индивидуального анкетирования экспертов. В анкете помимо формулировки задания следует представить шкалы бальных оценок значимости параметров строительных 3D-принтеров внутри каждой из подгрупп. При формировании шкалы оценивания целесообразно, на наш взгляд, использовать подход, в соответствии с которым минимальное количество баллов равняется 1, а максимальное – соответствует количеству параметров (характеристик) в группе (подгруппе). Таким об-

разом, в рамках настоящего исследования в первой подгруппе технико-технологических параметров максимальное количество баллов для наиболее значимого показателя составляет 6 баллов (см. табл. 1), для второй подгруппы – 3 балла, а для третьей подгруппы – 4 балла. Для группы экономических параметров наиболее важному, по мнению экспертов, показателю может быть присвоено максимально 4 балла.

После сбора информации от экспертов сначала нужно определить наличие неслучайной согласованности их оценок путем расчета коэффициента конкордации по формуле:

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^n S_i}{r^2(n^3-n)}, \quad (1)$$

где S_i – квадрат отклонений i -того свойства от средней суммы баллов; r – количество экспертов; n – количество свойств.

Особо следует указать, что только в случае, если полученное значение коэффициента конкордации попадет в интервал $0,7 \dots 0,8$, дальнейшая оценка конкурентоспособности 3D-принтеров может быть продолжена. При невыполнении этого условия необходимо внести коррективы либо в состав группы экспертов, либо в формулировку задания, и повторно провести опрос экспертов.

Оценка значимости параметров строительных 3D-принтеров базируется на схеме расчета коэффициентов весомости (M_i):

$$M_i = M' / \sum M', \quad (2)$$

где M' – средний коэффициент весомости i -того параметра принтера.

$$M' = \sum M' / r, \quad (3)$$

где M' – значение бальной оценки значимости параметра экспертом; r – количество экспертов, принявших участие в анкетировании.

Сумма полученных коэффициентов весомости в рамках каждой подгруппы (группы) должна удовлетворять условию:

$$\sum_{i=1}^n M_i = 1. \quad (4)$$

Для формирования базы сравнения и оценки конкурентоспособности принтеров на шаге 2 рассматриваемой методики осуществляется «отбор» строительных 3D-принтеров, имеющих сопоставимые значения конструктивных характеристик. По результатам такого отбора определяется некий «эталон» в виде виртуального принтера с наилучшими показателями по всем характеристикам печатных устройств из числа рассмотренных.

Далее на шаге 3 выполняется расчет единичных показателей конкурентоспособности (k_{ij}) для вошедших в базу сравнения принтеров. Поскольку характеристики технологических комплексов имеют различные единицы измерения, представляется обоснованным использование в этой процедуре относительных показателей, определяемых по схемам:

$k_{ij} = P_i / P_i^{\text{эт}}$ – для случая, когда увеличение значения параметра повышает технические возможности и экономическую эффективность принтера;

$k_{ij} = P_i^{\text{эт}} / P_i$ – для случая, когда технические возможности и экономическая эффективность принтера повышаются при уменьшении значения

параметра. При этом, $P_i^{\text{эт}}$ – значение i -того параметра принтера-эталона, а P_i – значение i -того параметра сравниваемого принтера.

Необходимо указать, что для характеристик принтеров, не имеющих количественного измерения, при формировании базы оценки конкурентоспособности разрабатывались собственные шкалы бальной оценки на основании анализа информации о характеристиках принтеров и напечатанных строительных объектах:

1) возможность работы с низкотекучими смесями: при наличии возможности – 1 балл, при отсутствии таковой – 0 баллов;

2) качество печатного слоя: слой без дефектов – 1 балл, слой с трещинами – 0 баллов;

3) качество поверхности объекта: поверхность гладкая, без дефектов – 1 балл, дефектная поверхность (с оплывами слоев и трещинами) – 0 – 0,9 баллов в зависимости от количества дефектов.

Затем на шаге 4 проводится расчет групповых индексов конкурентоспособности по различным группам характеристик и параметров принтеров. Для этого следует использовать общий подход, описываемый уравнением (5):

$$Q_{mj} = \sum_{i=1}^m k_{ij} \cdot M_i, \quad (5)$$

где Q_{mj} – групповой индекс конкурентоспособности по m -той группе параметров j -того вида принтера.

В заключение на последнем шаге приведенного выше алгоритма для каждого вошедшего в базу рассмотрения строительного 3D-принтера рассчитывается его интегральный показатель конкурентоспособности (Π_{kj}):

$$\Pi_{kj} = \frac{Q_{kl} + Q_{Tj} + Q_{oj}}{Q_{\Sigma j}}, \quad (6)$$

где Q_{kj} – групповой индекс конкурентоспособности j -того принтера по конструктивным характеристикам; Q_{Tj} – групповой индекс конкурентоспособности j -того принтера по характеристикам технологичности печати; Q_{oj} – групповой индекс конкурентоспособности j -того принтера по характеристикам напечатанных строительных объектов; $Q_{\Sigma j}$ – групповой индекс конкурентоспособности j -того принтера по экономическим параметрам.

В рамках предложенной методики наиболее конкурентоспособным признается 3D-принтер с наибольшим значением Π_{kj} .

Основная часть. Оценка значимости характеристик и параметров строительных 3D-принтеров, проведенная в соответствии с рассмотренным алгоритмом на основе анкетирования экспертов, показала, что наиболее важную роль в формировании конкурентных преимуществ этих

агрегатов играют обеспечиваемые ими площадь печати и качество печатного слоя, возможность работы с различными строительными смесями без переналадки, а также цена (табл. 2). Отметим, что группа экспертов общей численностью в 30 человек включала специалистов различных сфер и отраслей экономики: инженерно-технические работники строительной отрасли – 6 человек; высококвалифицированные работники научно-образовательной сферы – 12 человек; специалисты в области производства строительных изделий и конструкций – 7 человек; производители строительных 3D-принтеров – 5 человек.

Для формирования базы сравнения и оценки конкурентоспособности потребовался анализ ин-

формации, размещенной на сайтах производителей принтеров. По результатам анализа вне зависимости от типа, исходя из площади печати, выделены две категории принтеров:

1) *принтеры для строительства полноразмерных строительных объектов*, предназначенные для использования на строительной площадке. Площадь печати в 100 – 200 м² обеспечивает возможность возведения малоэтажных домов [19];

2) *принтеры для печати изделий и конструкций*, предназначенные для использования в производственных условиях. Площадь печати менее 10 м² позволяет создавать малые архитектурные формы, отдельные конструктивные и декоративные элементы зданий [20].

Таблица 2

Коэффициенты весомости параметров оценки конкурентоспособности 3D-принтеров по группам

Наименование характеристик и параметров	Значение коэффициента весомости параметра
<i>Конструктивные характеристики принтера</i>	
Площадь печати	0,23
Высота области печати	0,12
Точность позиционирования	0,18
Скорость печати	0,13
Площадь сечения печатного слоя	0,06
Соотношение области печати и габаритных размеров принтера	0,18
<i>Характеристики технологичности процесса печати</i>	
Возможность работы с различными строительными смесями (конструкционными, теплоизоляционными, отделочными) без переналадки	0,44
Возможность обеспечения роботизированной финишной отделки	0,23
Возможность работы с высоковязкими смесями, 50–60 Па·с	0,33
<i>Характеристики напечатанных строительных объектов</i>	
Качество печатного слоя (бездефектность)	0,40
Качество поверхности объекта	0,23
Максимальная площадь объектов	0,21
Максимальная высота объектов	0,16
<i>Экономические параметры принтера</i>	
Потребляемая мощность	0,19
Трудоемкость монтажа-демонтажа принтера	0,16
Трудоемкость обслуживания (количество операторов)	0,31
Цена	0,34

При этом в первую категорию вошли только порталные принтеры, для которых по данным сайтов удалось оценить всю совокупность их параметров (табл. 3 и 4), так как имеются данные об опыте печати и характеристиках реальных строительных объектов. Для второй категории (табл.

5) получилось рассчитать групповой индекс конкурентоспособности только по конструктивным характеристикам ввиду отсутствия необходимой информации.

Таблица 3

Характеристики строительных 3D-принтеров порталного типа, используемых для малоэтажного строительства

Наименование характеристик	Значение характеристик по видам принтеров			
	«АМТ» S-300 (АМТ-СПЕ-ЦАВИА, Россия) ⁵	BOD2 2-2-2 (COBOD BOD2, Дания) ⁶	Vulcan (ICON Vulc ⁷ an, США)	StroyBot concrete printer (Total Kustom, США)
<i>Конструктивные характеристики</i>				
Площадь печати, м ²	132	116	200	200
Высота области печати, м	4,0	5,6	3,2	6,0
Точность позиционирования, мм	± 2	± 2	± 1,5	± 2
Скорость печати, м/с	0,2	1,0	0,5	0,6
Площадь сечения печатного слоя, см ²	3	4	4	9
Соотношение области печати и габаритных размеров принтера	0,42	0,50	0,53	0,65
<i>Характеристики технологичности печати</i>				
Возможность работы с различными строительными смесями (конструкционными, теплоизоляционными, отделочными) без переналадки	0	1	0	0
Возможность обеспечения роботизированной финишной отделки	1	1	0	0
Возможность работы с низкотекучими смесями	0	1	1	0
<i>Характеристики напечатанных строительных объектов</i>				
Качество печатного слоя (бездефектность)	0	1	1	0
Качество поверхности объекта	0,5	1	0,7	0,5
Максимальная площадь объектов, м ²	120	100	180	118
Максимальная высота объектов	4	5,1	3,0	5,8
<i>Экономические параметры принтера</i>				
Потребляемая мощность, кВт	12	3,6	7,2	1,6
Трудоемкость монтажа-демонтажа принтера, ч	4	4	6	6
Трудоемкость обслуживания (количество операторов)	3	2	2	3
Цена, тыс. \$	8,5	500	370	400

⁵ <https://specavia.pro/>⁶ <https://cobod.com/>⁷ <https://www.iconbuild.com/vulcan>⁸ <http://www.totalkustom.com/>

Сопоставление значений групповых индексов и интегральных показателей конкурентоспособности порталных 3D-принтеров для малоэтажного строительства (см. табл. 4) позволяет утверждать, что лидером по уровню конкурентоспособности является принтер BOD2 2-2-2 датской компании «COBOD BOD2». Это обеспечивается наиболее высокими по отношению к конкурентам параметрами технологичности печати и качества строительных объектов. Отметим, что принтеры американских производителей, уступающая принтеру BOD2 2-2-2 по данным показателям, обладают, тем не менее, высокими индексами конкурентоспособности по конструктивным характеристикам. Аутсайдером, к сожалению, является принтер «AMT S-300» российской

компании «AMT-СПЕЦАВИА», который имеет существенно худшие значения всех параметров относительно зарубежных аналогов. Именно поэтому интегральный показатель его конкурентоспособности в 2 – 3,5 раза ниже, чем у зарубежных принтеров, несмотря на существенно меньшую цену.

Применительно к печати изделий и конструкций эталонными конструктивными характеристиками отличается робот-манипулятор FIXED нидерландской компании «CyBe Construction». Данный принтер обоснованно можно считать наиболее конкурентоспособным по сравнению с мини-принтерами порталной и дельта-конструкции.

Таблица 4

Значения групповых индексов и интегральных показателей конкурентоспособности порталных 3D-принтеров для малоэтажного строительства

Наименование групповых индексов и показателей конкурентоспособности	«AMT» S-300 (AMT-СПЕЦАВИА, Россия)	BOD2 2-2-2 (COBOD BOD2, Дания)	Vulcan (ICON Vulcan, США)	StroyBot concrete printer (Total Kustom, США)
Групповые индексы конкурентоспособности – по конструктивным характеристикам	0,60	0,77	0,77	0,90
– по характеристикам технологичности печати	0	1,00	0,33	0
– по характеристикам напечатанных строительных объектов	0,37	0,93	0,82	0,42
– по экономическим параметрам принтерам	0,70	0,56	0,47	0,51
Интегральный показатель конкурентоспособности	1,39	4,82	4,09	2,59

Таблица 5

Конструктивные характеристики строительных мини 3D-принтеров для печати строительных изделий и конструкций в производственных условиях

Наименование характеристик и показателей	Значение характеристик по типам и видам принтеров				
	портальный «AMT» S -6044 (AMT-СПЕЦАВИА, Россия)	портальный Mini Printer Pro (Constructions-3D, Франция)	манипулятор FIXED (CyBe Construction, Нидерланды)	Delta WASP 3MT CONCRETE (WASP 3 MT, Италия)	принтер-эталон
Площадь печати	5,3	1,4	7,5	1,0	7,5
Высота области печати, м	0,8	1,2	4,0	1,0	4,0
Точность позиционирования, мм	± 2	± 1,5	± 1,5	± 1,5	± 1,5
Скорость печати, м/с	0,2	7,5	25,0	20,0	25,0
Площадь сечения печатного слоя, см ²	3,00	2,25	25,00	9,00	25,00
Групповой индекс конкурентоспособности по конструктивным характеристикам	0,39	0,38	1,00	0,40	1,00

Проведенные исследования показали, что для малоэтажного строительства наиболее применимым является 3D-принтер порталного типа. При этом высоким уровнем конкурентоспособности на строительном рынке обладают принтеры BOD2 2-2-2 датской компании «COBOD BOD2». Отечественные принтеры отстают от зарубежных в наибольшей мере по технологичности печати и качеству напечатанных строительных объектов. С учетом этого обстоятельства, несмотря на самую низкую цену, их нельзя отнести к конкурентоспособным.

Применительно к печати изделий и конструкций в производственных условиях, наиболее конкурентоспособным следует признать робот-манипулятор. Этот тип принтера обладает эталонными конструктивными характеристиками, а высокая скорость печати позволяет обеспечивать достаточно большие объемы производства такой продукции, как малые архитектурные формы, отдельные конструктивные и декоративные элементы зданий. Поэтому именно в данном применении, когда ограниченная площадь печати не имеет принципиального значения, роботы-манипуляторы имеют существенные преимущества по сравнению с порталными и дельта-принтерами.

Выводы. Рассмотренный подход к оценке конкурентоспособности строительных 3D-принтеров представляет практический интерес, прежде всего, для производителей этих технологических комплексов. Полученное в результате реализации предложенной методики новое знание о значимости конструктивных решений 3D-принтеров создает стратегические ориентиры для отечественных производителей подобных агрегатов. Так, в качестве основных направлений технического совершенствования принтеров для малоэтажного строительства следует обозначить повышение скорости печати, оптимизацию соотношения области печати и габаритных размеров принтера, обеспечение возможности работы с низкотекучими смесями и с различными строительными смесями без переналадки, снижение дефектности печатного слоя и энергопотребления. Повышение конкурентоспособности отечественных 3D-принтеров без улучшения их технико-технологических параметров, а только лишь за счет снижения цены в условиях конкурентного строительного рынка следует считать нецелесообразным. Именно недостаточная проработанность конструктивных решений принтеров является, по мнению авторов, одним из существенных факторов сдерживания широкого внедрения в практику строительства технологии 3D-печати.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tay Y., Panda B., Paul S.C., Mohamed N.A.N., Tan M., Leong K. 3D printing trends in building and construction industry: a review // *Virtual Phys. Prototyp.* Taylor & Francis. 2017. Vol. 12, № 3. Pp. 261–276. DOI:10.1080/17452759.2017.1326724.
2. Labonnote N., Rønning A., Manum B., Rütther P. Additive Construction: state of the art, challenges and opportunities Automation in Construction Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities // *Autom. Constr.* Elsevier B.V., 2016. № 9. Pp. 2017–2024. DOI:10.1016/J.AUTCON.2016.08.026.
3. Kamram M., Hussein A.B. 3D Printing Concrete Technology and Mechanics from Industrial Aspect // *Energy Policy.* 2020. № 3. Pp. 2–12.
4. Albar A., Chougan Mehdi, Al-Kheetan Mazen J., Swash M., Ghaffar S. Effective extrusion-based 3D printing system design for cementitious-based materials // *Results Eng.* Elsevier Ltd. 2020. Vol. 6, № 5. 100135. DOI:10.1016/j.rineng.2020.100135.
5. Ngo T., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // *Composites Part B: Engineering.* 2018. Vol. 143. Pp. 111–132. DOI:10.1016/J.COMPOSITESB.2018.02.012.
6. Bos F., Wolfs R., Ahmed Z., Salet T. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing // *Virtual Phys. Prototyp.* 2016. Vol. 11, № 3. Pp. 209–225. DOI:10.1080/17452759.2016.1209867.
7. Nerella V., Krause M., Mechtcherine V. Practice-oriented buildability criteria for developing 3D-printable concretes in the context of digital construction // *Highlights.* 2019. № 8. 2018. Pp. 1–28. DOI:10.20944/PREPRINTS201808.0441.V1.
8. Zeina Malaeb, Hussein A. Hachem, Tourbah A., Maalouf T., Nader El Zarwi, Hamzeh F. 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design // *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 2015. Vol. 6, № 4. Pp. 14–22.
9. Taqdees Anjum, Poorvesh Dongre, Fozail Misbah, V. N. Nanyam. Purview of 3DP in the Indian Built Environment Sector // *Procedia Eng.* 2017. Vol. 196, № 6. P. 228–235. DOI:10.1016/J.PROENG.2017.07.194.
10. Краева А.А., Волкова Е.С., Шмарина С.В. Определение конкурентоспособности 3D-принтера марки «DESIGNER X PRO» // *Синергия Наук.* 2019. № 32. С. 24–30.
11. Чазов Е. Л., Грахов В. П. Разработка методического инструментария оценки конкурентоспособности промышленного предприятия на основе мониторинга рынка сбыта продукции // *Управленческий учет.* 2021. № 2. С. 65–72.

12. Акулова И.И., Славчева Г.С. Оценка конкурентоспособности строительных материалов и изделий: обоснование и апробация методики на примере цементов // Жилищное строительство. 2017. № 7. С. 9–12.

13. Макарова Л.В., Тарасов Р.В., Резевич К.С. Оценка конкурентоспособности строительной продукции // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. С. 17.

14. Ивановская И.В., Казанский А.В. Методические подходы к оценке конкурентоспособности продукции промышленного предприятия // Экономический журнал. 2020. № 2 (58). С. 6–19.

15. Овчаров А.В., Бабкина Т.В. Формирование комплексного подхода к оценке конкурентоспособности продукции промышленного предприятия // Креативная экономика. 2021. Т. 15. № 10. С. 3805–3822. DOI: 10.18334/ce.15.10.113698.

16. Маткова М. В., Милюшенко О. А. Обзор методов оценки конкурентоспособности предприятия с учетом специфики промышленного предприятия. // В сборнике: Актуальные тренды в экономике и финансах. Материалы межвузов-

ской научно-практической конференции магистрантов. Под редакцией В.А. Ковалева, А.И. Ковалева. 2019. С. 191–196.

17. Akulova I.I., Slavcheva G.S. A new approach to identifying top-priority step for increasing the building materials competitiveness // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. International science and technology conference «FarEastCon-2020». 2021. Vol. 1079. 032030. DOI:10.1088/1757-899X/1079/3/032030.

18. Белоусова Д.С. Понятие и сущность конкурентоспособности. Факторы, влияющие на конкурентоспособность // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. 2016. № 15-2. С. 72–76.

19. Акулова И.И., Славчева Г.С., Макарова Т.В. Техничко-экономическая оценка эффективности применения 3D-печати в жилищном строительстве // Жилищное строительство. 2019. № 12. С. 52–56. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-12-52-56.

20. Славчева Г.С., Акулова И.И., Вернигора И.В. Концепция и эффективность применения 3D-печати для дизайна городской среды // Жилищное строительство. 2020. № 3. С. 49–55. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-3-49-55.

Информация об авторах

Славчева Галина Станиславовна, доктор технических наук, профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций. E-mail: gslavcheva@yandex.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

Акулова Инна Ивановна, доктор экономических наук, профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций. E-mail: akulovaii@yandex.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

Юров Павел Юрьевич, магистрант профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций. E-mail: yurov.py@yandex.ru. Воронежский государственный технический университет. Россия, 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84.

Поступила 18.09.2022 г.

© Славчева Г.С., Акулова И.И., Юров П.Ю., 2023

***Slavcheva G.S., Akulova I.I., Yurov P.Y.**

Voronezh State Technical University

E-mail: gslavcheva@yandex.ru

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF 3D-BUILD PRINTER COMPETITIVENESS

Abstract. This article proposes a method for assessing the competitiveness of building 3D printers based on a comparison of their technical and technological characteristics and economic parameters. The methodology implements an integrated approach that takes into account a large number of comparison parameters of a different nature based on the use of relative indicators. The calculation takes into account the design characteristics of printers, the characteristics of the manufacturability of the printing process, the characteristics of printed building objects and the economic parameters of printers. So, for low-rise construction, the essential parameters are: printing speed, the ratio of the print area and the overall dimensions of the printer, the ability to work with low-flow mixtures and with various building mixtures without readjustment, reducing the defectiveness of the printed layer and energy consumption. The most competitive is the printer that provides more units of useful effect, determined by a set of technical and technological characteristics, per unit of costs

associated with the purchase of a printer, its energy consumption, the laboriousness of maintenance and installation and dismantling at a construction site. As a result of assessing the competitiveness of various types of printers, it was revealed that the leader for low-rise construction is the portal printer BOD2 2-2-2 of the Danish company COBOD BOD2. For printing building products and structures in a production environment, the FIXED robotic arm from the Netherlands has a competitive advantage. CyBe Construction. The considered approach to assessing the competitiveness of building 3D printers is of practical interest to their manufacturers. The new knowledge about the significance of the design solutions of 3D printers, obtained as a result of the implementation of the proposed methodology, creates strategic guidelines for domestic manufacturers.

Keywords: 3D-build printer, competitiveness, machine design, economic parameters.

REFERENCES

1. Tay Y., Panda B., Paul S.C., Mohamed N.A.N., Tan M., Leong K. 3D printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual Phys. Prototyp.* Taylor & Francis. 2017. Vol. 12, No. 3. Pp. 261–276. DOI:10.1080/17452759.2017.1326724.
2. Labonnote N., Rønnquist A., Manum B., Rütther P. Additive Construction: state of the art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. Autom. Constr. Elsevier B.V., 2016. No. 9. Pp. 2017–2024. DOI:10.1016/J.AUTCON.2016.08.026.
3. Kamram M., Hussein A.B. 3D Printing Concrete Technology and Mechanics from Industrial Aspect. *Energy Policy*. 2020. No 3. Pp. 2–12.
4. Albar A., Chougan Mehdi, Al-Kheetan Mazen J., Swash M., Ghaffar S. Effective extrusion-based 3D printing system design for cementitious-based materials. *Results Eng.* Elsevier Ltd. 2020. Vol. 6, No. 5. 100135. DOI:10.1016/j.rineng.2020.100135.
5. Ngo T., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 143. Pp. 111–132. DOI:10.1016/J.COMPOSITESB.2018.02.012.
6. Bos F., Wolfs R., Ahmed Z., Salet T. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual Phys. Prototyp.* 2016. Vol. 11, No. 3. Pp. 209–225. DOI:10.1080/17452759.2016.1209867.
7. Nerella V., Krause M., Mechtcherine V. Practice-oriented buildability criteria for developing 3D-printable concretes in the context of digital construction. *Highlights*. 2019. No. 8. 2018. Pp. 1–28. DOI:10.20944/PREPRINTS201808.0441.V1.
8. Zeina Malaeb, Hussein A. Hachem, Tourbah A., Maalouf T., Nader El Zarwi, Hamzeh F. 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design. *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 2015. Vol. 6, No 4. Pp. 14–22.
9. Taqdees Anjum, Poorvesh Dongre, Fozail Misbah, V. N. Nanyam. Purview of 3DP in the Indian Built Environment Sector. *Procedia Eng.* 2017. Vol. 196, No. 6. Pp. 228–235. DOI:10.1016/J.PROENG.2017.07.194.
10. Kraeva A.A., Volkova E.S., Shmarina S.V. Assessing the competitiveness of the "DESIGNER X PRO". [Opredelenie konkurentosposobnosti 3D-printera marki «DESIGNER X PRO»]. *Sinergiya Nauk*. 2019. No. 32. Pp. 24–30. (rus)
11. Chazov E. L., Grahov V. P. Development of methodical toolkit of an estimation of competitiveness of industrial enterprise on the basis of monitoring of market of products. [Razrabotka metodicheskogo instrumentariya ocenki konkurentosposobnosti promyshlennogo predpriyatiya na osnove monitoringa rynka sbyta produkci]. *Upravlencheskij uchet*. 2021. No. 2–1. Pp. 65–72. (rus)
12. Akulova I.I., Slavcheva G.S. Assessment of competitiveness of building materials and products: justification and approbation of methods on the example of cements. [Ocenka konkurentosposobnosti stroitel'nyh materialov i izdelij: obosnovanie i aprobaciya metodiki na primere cementov]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2017. No. 7. Pp. 9–12. (rus)
13. Makarova L.V., Tarasov R.V., Rezevich K.S. Assessment of the competitiveness of the construction products. [Ocenka konkurentosposobnosti stroitel'noj produkcii]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015. No. 1-1. P. 17. (rus)
14. Ivanovskaya I.V., Kazanskij A.V. Methodological approaches to assessing the competitiveness of industrial enterprise products. [Metodicheskie podhody k ocenke konkurentosposobnosti produkcii promyshlennogo predpriyatiya]. *Ekonomicheskij zhurnal*. 2020. No. 2 (58). Pp. 6–19. (rus)
15. Ovcharov A.V., Babkina T.V. An integrated approach to assessing the competitiveness of industrial enterprise products [Formirovanie kompleksnogo podhoda k ocenke konkurentosposobnosti produkcii promyshlennogo predpriyatiya]. *Kreativnaya ekonomika*. 2021. Vol. 15. No. 10. Pp. 3805–3822. DOI: 10.18334/ce.15.10.113698 (rus)
16. Matkova M.V., Milyushenko O.A. Review of metrics for assessing the competitiveness of products taking into account the specifics of the industrial enterprise [Obzor metodov ocenki

konkurentosposobnosti predpriyatiya s uchetom specifiki promyshlennogo predpriyatiya] Materialy mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii magistrantov. Pod redakciej V.A. Kovaleva, A.I. Kovaleva. 2019. Pp. 191–196. (rus)

17. Akulova I.I., Slavcheva G.S. A new approach to identifying top-priority step for increasing the building materials competitiveness. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. International science and technology conference «FarEastCon-2020». 2021. Vol. 1079. 032030. DOI:10.1088/1757-899X/1079/3/032030.

18. Belousova D.S. The concept and essence of competitiveness. Factors affecting the competitiveness [Ponyatie i sushchnost' konkurentosposobnosti. Faktory, vliyayushchie na konkurentosposobnost']. Fundamental'nye i

prikladnye issledovaniya v sovremennom mire. 2016. No. 15-2. Pp. 72–76. (rus)

19. Akulova I.I., Slavcheva G.S., Makarova T.V. Technical and economic estimate of efficiency of using 3d printing in housing construction [Tekhniko-ekonomicheskaya ocenka effektivnosti primeneniya 3D-pechati v zhilishchnom stroitel'stve]. Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2019. No. 12. Pp. 52–56. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-12-52-56. (rus)

20. Slavcheva G.S., Akulova I.I., Vernigora I.V. Konzept and effectiveness of 3D printing for urban environment design [Konceptiya i effektivnost' primeneniya 3D-pechati dlya dizajna gorodskoj sredy]. Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2020. No. 3. Pp. 49–55. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-3-49-55 (rus)

Information about the authors

Slavcheva, Galina S. DSc, Professor, department of technology of building materials, products and structures. E-mail: gslavcheva@yandex.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, 20 let Oktyabrya st., 84.

Akulova, Inna I. DSc, Professor, department of technology of building materials, products and structures. E-mail: akulovaii@yandex.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, 20 let Oktyabrya st., 84.

Yurov, Pavel Y. Master student, department of technology of building materials, products and structures. E-mail: yurov.py@yandex.ru. Voronezh State Technical University. Russia, 394006, Voronezh, 20 let Oktyabrya st., 84.

Received 18.09.2022

Для цитирования:

Славчева Г.С., Акулова И.И., Юров П.Ю. Комплексная оценка конкурентоспособности строительных 3D-принтеров // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 1. С. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-8-18

For citation:

Slavcheva G.S., Akulova I.I., Yurov P.Y. Comprehensive assessment of 3D-build printer competitiveness. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 1. Pp. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-1-8-18