

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ДЕРЕВА ОТКАЗОВ В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ БЕТОНУКЛАДОЧНЫХ МАШИН

Васильев Я.В., Гусева А.В.

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: аддитивное строительное производство, 3D-печать бетона, численное моделирование, печать на основе экструзии, моделирование процессов, роботизированные бетоноукладочные машины, дерево отказов.

Аннотация. Данное исследование посвящено анализу эффективности применения роботизированных бетоноукладочных машин (РБМ) для возведения зданий и сооружений, с использованием бетонного композита на экспериментальной установке порталного типа. Исследование было направлено на изучение процессов смешивания, подачи и укладки смеси из бетонного композита с целью выявления недостатков системы и оценки неисправностей, возникающих в процессе работы экспериментальной установки с помощью анализа дерева неисправностей. Были определены причины отказов и их последствия, а также были изучены компоненты, в которых была зафиксирована неисправность. После оценки полученных данных были составлены диаграммы соотношения выявленных отказов. На основании данного анализа были сформированы критерии эффективности применения роботизированных бетоноукладочных машин в аддитивном строительстве зданий и сооружений.

FAILURE TREE STRUCTURE ANALYSIS FOR EVALUATION OF ROBOTIC CONCRETE PAVING MACHINE APPLICATION EFFICIENCY

Vasilev Ya. V., Guseva A. V.

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg

Keywords: additive manufacturing, concrete 3D printing, numerical simulation, extrusion-based printing, process simulation, robotic laying machines, fault tree.

Abstract. This research deals with analyzing the effectiveness of robotic concrete paving machines (RCPV) for the construction of buildings and structures, using concrete composite on a gantry-type pilot plant. The study was aimed at investigating the mixing, feeding and placing processes of the concrete composite mix in order to identify system deficiencies and to evaluate the failures occurring during the operation of the pilot plant using fault tree analysis. The causes of the failures and their consequences were identified and the components where the fault was recorded were analyzed. After analyzing the data obtained, the correlation diagrams of the identified failures were drawn up. Performance criteria for the use of robotic concrete paving machine in additive building construction of buildings and structures were formed based on this analysis.

Введение. Аддитивные технологии – обобщенное название технологий, предполагающих изготовление изделия по данным цифровой модели (или CAD-модели) методом добавления материала [1]. Данная технология возникла более 20 лет назад и на сегодняшний день применяется во многих отраслях производства [2-4], а ее применение в строительной области имеет большой потенциал [5, 6]. В данной статье представлены результаты анализа факторов, влияющих на процессы смешивания, подачи и укладки бетонного композита в процессе возведения экспериментальных печатных элементов на экспериментальной установке, которые могут приводить к отказам системы и ее компонентов, а также к утилизации самих образцов изделий. На основании этих данных был произведен анализ дерева отказов РБМ, проанализирована статистика, а также составлены критерии эффективности применения РБМ в аддитивном строительстве.

Анализ литературных данных и постановка проблемы

Для полноценного изучения проблем, возникающих в процессе возведения строительных конструкций и форм при помощи РБМ существует необходимость в разработке метода классификации и систематизации этих событий, приводящих к отказам. Наиболее

подходящим методом анализа является дерево отказов. Анализ дерева неисправностей заключается в определении и анализе условий и факторов, которые приводят или могут привести к возникновению негативных завершающих событий – полной или частичной утрате функций, деградации рабочих характеристик изделия, ухудшению безопасности или других важных рабочих свойств [7].

Данное направление исследований весьма скудно освещено в отечественных и зарубежных публикациях, среди которых следует отметить что надежность (безотказность) применения РБМ весьма в общем виде оценивается как критерий эффективности применения РБМ [8, 9].

Для корректного наблюдения и оценки отказов, проявляющихся в процессе производства, требуется произвести укладку соответствующих элементов с помощью РБМ.

Материалы и методы

Исследование проводилось на экспериментальной установке порталного типа, созданной на базе МИП «СПбГАСУ-Дорсервис», смонтированной в Ломоносовском регионе Ленинградской области на участках коттеджного строительства. Для исследования отказов, связанных с процессами смешивания, подачи и укладки, а также других технологических проблем в процессе строительства, были разработаны и изготовлены 60 опытных конструкций, их формы и габариты представлены в таблице 1. Данные экспериментальные образцы являются базовыми формами для типовых конструкций, наиболее широко используемых в строительстве с использованием РБМ.

При осуществлении укладки бетонной смеси указанных элементов производилось фиксирование отказов с целью их последующего анализа.

Для управления процессами строительства экспериментальной роботизированной бетоноукладочной машины использовался язык программирования G-Code, который задает положение каждой оси и количество подачи используемой бетонной смеси. Управление РБМ осуществлялось с помощью программного обеспечения Repetier-Host с индивидуальными настройками привода экспериментальной установки и ее параллельной имитацией на базе модели, разработанной в Matlab/Simulink.

Был выбран бетонный композит для использования в данном проекте, который состоит из портландцемента ЦЕМ II с минеральными добавками [10], мелкого мытого песка, просеянного через сито с ячейками 10, с максимальным размером частиц 1.68 мм и с использованием пластифицирующей добавки Axton [11]. Песок был дважды просеян, чтобы обеспечить соблюдение максимального диаметра 2 мм, допустимого насосной системой.

Перед загрузкой в бак насоса укладываемый материал смешивался в бетономесителе Denzel B-160. Этапы процедуры смешивания соответствуют [12].

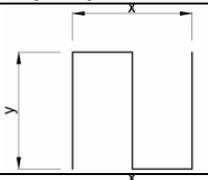
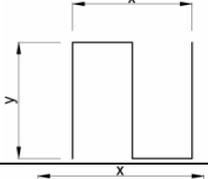
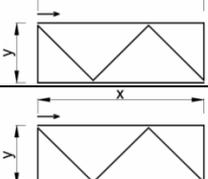
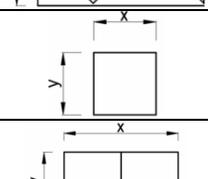
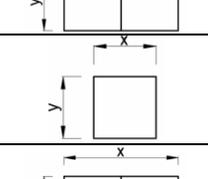
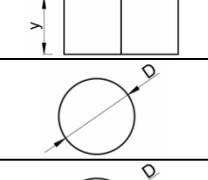
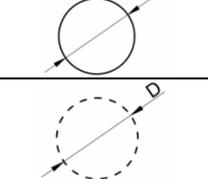
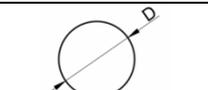
Все случаи отказов при экспериментальной укладке печатных элементов (образцов) по таблице 1 были зафиксированы на основании исследования возведенных экспериментальных элементов, затем отказы были объединены в группы, а их причины и последствия были подвергнуты анализу в процессе построения дерева отказов.

Для первого этапа разработки дерева отказов необходимо определить главное событие, компоненты системы, их взаимодействия и ограничения системы. В данном случае под системой принимается совокупность интегрируемых и взаимодействующих элементов конструкции РБМ, обеспечивающих процессы смешивания, подачи и укладки композитной смеси в ходе применения РБМ по назначению.

Отказы, возникающие в процессе смешивания, подачи и укладки были классифицированы по компонентам системы, на которые они влияют и определено, к какому событию они относятся. Для этого все отказы были разделены по классам на: главные, промежуточные, вторичные и основные. В качестве главного отказа было выбрано событие – утилизация полученного образца, так как оно охватывает наибольшее число неисправностей системы. При этом в общем виде под событием утилизации образца понимается наличие в образце дефектов и отклонений от требуемой формы, включая разрушение или потерю устойчивости опытных конструкций, приводящих к необходимости его утилизировать, так

как его применение по назначению невозможно. Промежуточное событие можно определить как сложное событие, которое является одной из возможных причин результирующего события. Оно выявляется в процессе анализа причин главного события и подвергается дальнейшему анализу. Основные события в дереве отказов находятся на самом нижнем уровне, которые не являются результатами других событий. Вторичные события возникают из-за недостатка информации или из-за отсутствия конкретной причины, вызывающей данный отказ.

Табл. 1. Экспериментальные печатные элементы

Условное обозначение укладываемого элемента	Форма элемента, путь укладки	Кол-во слоев, шт.	Размеры, м			Кол-во экспериментов
			x	y	D	
C_1		2	1,0	1,0	-	5
C_2		5	1,0	1,0	-	5
C_3		2	1,38	1,0	-	5
C_4		5	1,38	1,0	-	5
B_1		2	0,5	0,5	-	5
B_2		5	1,0	0,5	-	5
B_3		2	0,5	0,5	-	5
B_4		2	1,0	0,5	-	5
Z_1		2	-	-	0,6	5
Z_2		4	-	-	0,6	5
Z_3		2	-	-	0,6	5
Z_4		4	-	-	0,6	5

Примечание: С – строительный элемент (типовой участок укладки в контурном строительстве); Б – блок (элемент сборной конструкции); З – защитный/декоративный элемент (вокруг столба или колонны, вазон и иные малые архитектурные формы).

Компоненты системы, в которых были обнаружены отказы, были связаны с программным обеспечением (ошибки связи/передачи кода), оборудованием, насосом, экструдером, кодом (ошибки формирования кода), бетонной смесью и укладываемым материалом. Кроме того, помимо компонентов системы РБМ, отказы могут возникать по причинам внешних воздействий на модель.

Для полноценного исследования были проанализированы основные события, которые сами по себе или при воздействии другого базового события приводят к главной неисправности в вершине дерева отказов.

Полное дерево отказов состоит из 223 элементов и представлено в виде таблиц 2-5, разделенных по основному типу событий, где указаны данные об отказах, в каких компонентах они возникают и их последствиях. Номера отказов указаны в соответствии с иерархией дерева, а также таблица выделена цветами по типу компонентов.

Табл. 2. Отказы по основному типу событий

№	Отказ	Последствия	Компонент
3	Недостаточная высота подъема форсунки	Слои с различными поперечными сечениями	Код - Параметры
4	Несоответствующая высота подъема сопла	Слои с различными поперечными сечениями	Код - Параметры
5	Непропорциональное соотношение воды и цемента	Материал повышенной прочности	Материал - смесь
8	Острые изгибы	Скопление материала в местах соединения слоев	Код - Геометрия
		Разрыв уклад-мой смеси	
14	Несоответствующий диаметр шланга подачи	Засоры в системе	Насос - шланг
17	Тонкий слой укладываемого материала	Смятие уклад-ых слоев	Укладываемый материал
20	Несоответствующая геометрия укладки слоя	Смятие уклад-ых слоев	Код - Геометрия
23	Внешнее ударное воздействие на укладываемые элементы	Расслоение укладываемого материала	Внешнее воздействие
		Полное или частичное разрушение	
24	Неравномерное размешивание бетонного композита	Материал повышенной прочности	Материал - смесь
25	Несоответствия свойств материала между партиями	Слои с различными поперечными сечениями	Материал - Смешивание
28	Недостаточный интервал между слоями	Внутреннее структурирование не происходит в необходимые сроки	Код - Параметры
		Сухая поверхность слоя	
31	Материал с очень медленным временем схватывания	Внутреннее структурирование не происходит в необходимые сроки	Материал - смесь
32	Ограничение перемещений оборудования	Перекосы слоев	Оборудование - Детали
34	Материал с очень быстрым временем схватывания	Сухая поверхность слоя	Материал - Смесь
		Преждевременное затвердевание хранимого материала	
35	Материал находится в состоянии покоя в течение длительного времени	Преждевременное затвердевание хранимого материала	Материал - Хранение

Табл. 2. Продолжение

№	Отказ	Последствия	Компонент
37	Неоднородный материал	Смятие уклад-ых слоев	Материал - смесь
		Недостаточная прочность материала	
38	Плохое смешивание материала	Сегрегация материалов	Материал - Смешивание
42	Избыточный вес последующих слоев	Повышенная деформация нижних слоев	Укладываемый материал
44	Изменение положения элемента или оборудования	Несоответствие теоретической модели	Внешнее воздействие
45	Проблемы с кодом	Изм. подачи материала	Код
		Несоответствие теоретической модели	
46	Проблемы в системе РБМ	Изм. подачи материала	Экструзия
48	Перерасход материалов при неправильном планировании	Преждевременное затвердевание хранимого материала	Материал - Смешивание
51	Несоблюдаемое время работы	Преждевременное затвердевание хранимого материала	Код - Параметры
55	Расслоение	Сегрегация материалов	Материал
57	Несоответствие скорости движения сопла и скорости укладки смеси	Разрыв уклад-мой смеси	Код - Параметры
		Изменение размеров укладываемой смеси	

Табл. 3. Отказы по промежуточному типу событий

№	Отказ	Последствия	Компонент
1	Скопление материала на участках укладки	Отсутствие эстетического вида	Укладываемый материал
2	Наращение напряжений	Полное или частичное разрушение	Укладываемый материал
6	Слои с различными поперечными сечениями	Отсутствие эстетического вида	Укладываемый материал
		Недостаточная устойчивость	
7	Полное или частичное разрушение	Утилизация полученных образцов	Укладываемый материал
9	Смятие уклад-ых слоев	Недостаточная устойчивость	Укладываемый материал
10	Повышенная деформация нижних слоев	Отсутствие эстетического вида	Укладываемый материал
		Недостаточная устойчивость	
12	Расслоение укладываемого материала	Утилизация полученных образцов	Укладываемый материал
13	Разрыв уклад-мой смеси	Уменьшение площади соприкосновения	Укладываемый материал
		Отсутствие эстетического вида	
		Недостаточная устойчивость	
15	Разница между состояниями слоев	Холодные швы	Укладываемый материал
16	Уменьшение площади соприкосновения	Низкая степень сцепления слоев	Укладываемый материал
18	Засоры в системе	Прерывание укладки смеси	Насос
19	Отсутствие эстетического вида	Утилизация полученных образцов	Укладываемый материал

Табл. 3. Продолжение

№	Отказ	Последствия	Компонент
21	Преждевременное затвердевание хранимого материала	Изменение консистенции материала	Материал - Хранение
22	Внутреннее структурирование не происходит в необходимые сроки	Недостаточная прочность материала	Материал
26	Недостаточная устойчивость	Полное или частичное разрушение	Укладываемый материал
27	Прерывание укладки смеси	Утилизация полученных образцов	Внешнее воздействие
29	Холодные швы	Низкая степень сцепления слоев	Укладываемый материал
30	Низкая степень сцепления слоев	Нарастание нагрузки	Укладываемый материал
		Расслоение укладываемого материала	
		Смятие уклад-ых слоев	
36	Материал повышенной прочности	Разрыв уклад-мой смеси	Материал - смесь
		Засоры в системе	
39	Перекосы слоев	Отсутствие эстетического вида	Укладываемый материал
		Недостаточная устойчивость	
40	Потеря формы после осаждения	Изменение размеров укладываемой смеси	Материал - смесь
41	Несоответствие теоретической модели	Перекосы слоев	Код - Происхождение
49	Недостаточная прочность материала	Повышенная деформация нижних слоев	Материал - смесь
		Потеря формы после осаждения	
50	Сухая поверхность слоя	Холодные швы	Укладываемый материал
52	Изм. подачи материала	Изменение размеров укладываемой смеси	Код - Параметры
53	Изменение консистенции материала	Слои с различными поперечными сечениями	Материал - смесь
		Материал повышенной прочности	
		Изм. подачи материала	
		Разница между состояниями слоев	
54	Сегрегация материалов	Засоры в системе	Материал
56	Изменение размеров укладываемой смеси	Уменьшение площади соприкосновения	Укладываемый материал
		Отсутствие эстетического вида	
		Недостаточная устойчивость	

Для каждой группы отказов были определены вероятные причины, последствия и компоненты, на которых произошли неисправности. На основе имеющихся данных было построено дерево отказов для наглядного представления проанализированных данных на рисунке 1.

Табл. 4. Отказы по вторичному типу событий

№	Отказ	Последствия	Компонент
33	Неисправные контактные соединения	Прерывание укладки смеси	Оборудование - Кабели
43	Проблемы с подачей смеси	Скопление материала в местах соединения слоев	Насос
		Засоры в системе	
		Изм. подачи материала	
47	Проблемы с программным обеспечением	Прерывание укладки смеси	ПО

Табл. 5. Отказы по главному типу событий

№	Отказ	Последствия	Компонент
11	Утилизация образцов	-	Укладываемый материал

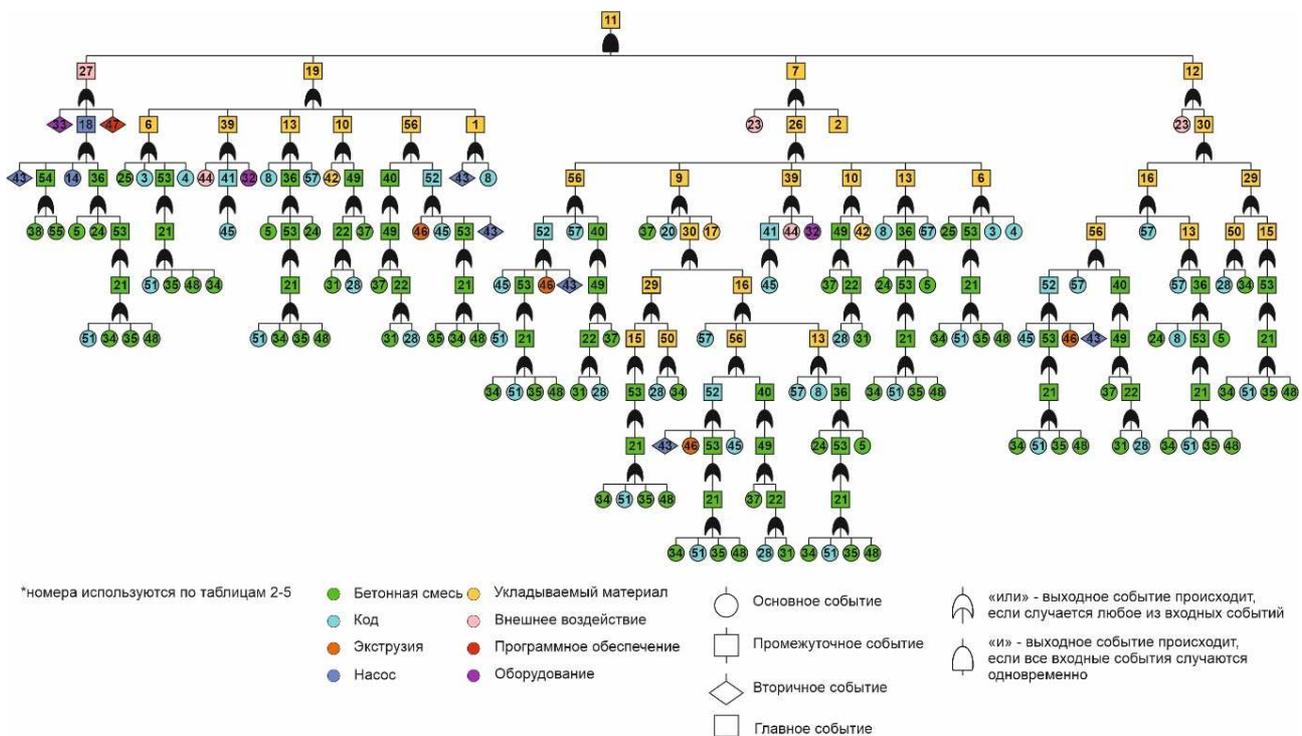


Рис. 1. Дерево отказов РБМ

Результаты и обсуждение

На основе проанализированных данных были составлены диаграммы соотношения выявленных отказов: типу событий (рис. 2), по типу задействованных в отказе компонентов РБМ (рис. 3) и отказов по виду процесса РБМ, в котором чаще всего возникает отказ (рис. 4), а также диаграмма количества отказов по виду процесса РБМ в экспериментальных моделях (рис. 5).

В ходе представленных исследований было выявлено, что среди всех отказов системы РБМ наиболее часто происходят промежуточные события, они составляют 49% от общей суммы отказов, которые ведут в дальнейшем к накоплению неисправностей в системе и приводят к утилизации всей модели. На основные отказы приходится 46% от суммы всех отказов. Из-за вторичных отказы, которые возникают по недостаточно изученным причинам, приходит 5% неисправностей.

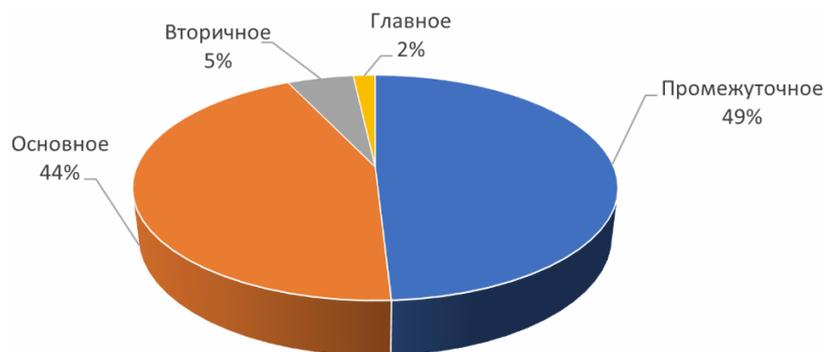


Рис. 2. Отказы по типу событий

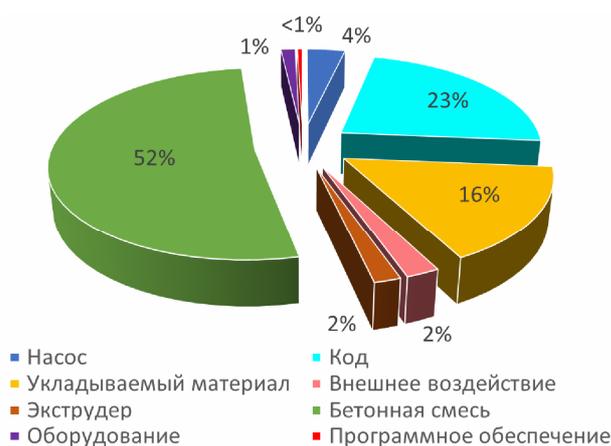


Рис. 3. Отказы по типу компонента РБМ



Рис. 4. Отказы по типу процесса РБМ

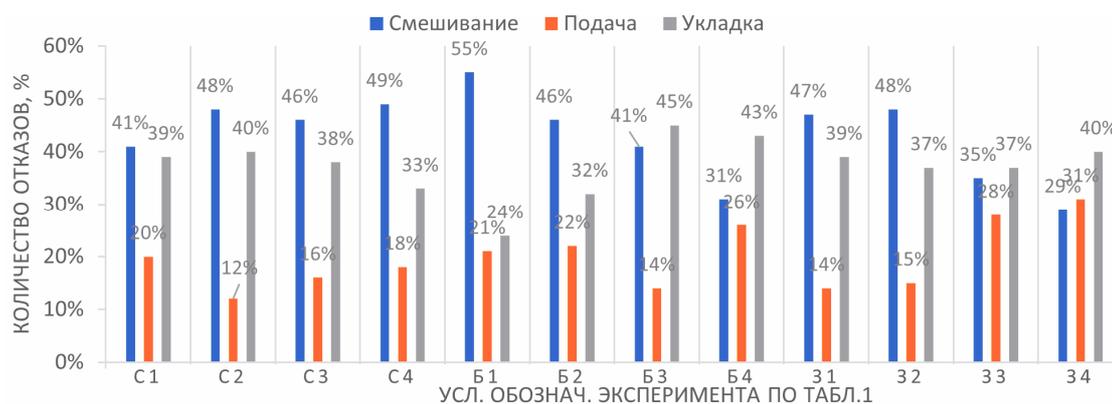


Рис. 5. Количество отказов по виду процесса на экспериментальных образцах

Основной причиной возникновения неисправностей является несоответствующая бетонная смесь, которая приводит к 52% отказов системы РБМ, это связано с неправильно выбранными свойствами материала и присадками, которые ведут к дальнейшим неисправностям. На втором месте по существующим причинам отказов оказываются проблемы с кодом, из-за которых возникает 23% неисправностей, а также 16% отказов происходит по причине неподходящих свойств укладываемого слоя. На остальные компоненты отказов приходится не более 5%.

На основании изучения 12 экспериментальных конструктивных элементов была составлена общая диаграмма отказов в процессах смешивания, подачи и укладки. На процесс смешивания приходится 42% всех неисправностей, на процесс укладки – 38%, а на процесс подачи – 20%.

Выводы

В рамках настоящего исследования надежности/безотказности системы РБМ была создана экспериментальная установка, с помощью которой были возведены 60 различных опытных конструкций для оценки неисправностей в процессах смешивания, подачи и

укладки, а также выполнены параллельные численные эксперименты на имитационной модели установки и накоплены данные по каждому эксперименту. Данный подход может быть также применен для РБМ других типов, согласно классификации по пространственному методу работы (в соответствии с ПНСТ 495-2020 [13]).

Для дальнейшего формирования методики выбора рациональных параметров и режимов работы роботизированных бетоноукладочных машин, прогнозирования ее эффективности, ресурсоемкости и производительности требуется накопление данных соотношений отказов для более сложных типов укладываемых элементов и других композитных материалов.

Здесь следует особо отметить, что на настоящий момент в РФ понятие эффективности применения РБМ не определено на уровне ГОСТ Р или ПНСТ. При этом, «эффективность» в самом общем представлении определяется соотношением получаемых результатов и затрачиваемых при этом ресурсов – финансовых, трудовых, материальных и др. Для решения конкретных проблем оценка эффективности может осуществляться на основе сравнения ряда показателей исследуемых объектов, систем, материалов, технологий, отражающих уровень «ресурсоемкости», с показателями аналогов.

С учетом выполненных исследований авторами было предложено понятие «Эффективность применения РБМ» это комплексное свойство использования РБМ по назначению, сопряженное с рациональным использованием ее технического потенциала при допустимых затратах ресурсов и времени, характеризуемое критериями, показанными на рисунке 6.



Рис. 6. Структура критериев эффективности применения РБМ

В данной структуре эффективность применения РБМ определяют критерии эффективности, которые подразделяются на технические, хозяйственные, производственные, критерии надежности и безопасности, критерии готовности к цифровому производству, критерии готовности возводимого объекта, а также социальные критерии. Исследование каждого из них является предметом отдельных исследований, выходящих за рамки настоящей статьи.

Заключение

Полученные результаты позволили сформировать структуру критериев оценки эффективности применения РБМ, а также выявить направления дальнейших исследований. Полученное дерево отказов позволяет выделить ключевые отказы в группы, исследование систематичности возникновения которых, с учетом конструктивных особенностей различных видов РБМ требует продолжения исследований.

Параллельное накопление данных по эксплуатации РБМ при ее применении в печати экспериментальных образцов и изделий, позволит в дальнейшем развить аппарат моделирования процессов смешивания, подачи и укладки смесей как в ракурсе на обеспечение эффективности аддитивного строительства в целом, так и в ракурсе на обеспечение надежности и безопасности РБМ при выборе рациональных технических,

производственных и экономических критериев ее эффективного применения. При этом существенную роль в формировании моделей эксплуатации РБМ учитывая полученные результаты займет прогнозирование отказов системы, на основе многокритериальной оценки и накопления больших объемов данных по эксплуатации.

Список литературы

1. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении: Учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ, 2013. – 221 с.
2. Chen Lian, He Yong, Yang Yingxin, Niu Shiwei, Ren Haitao. The research status and development trend of additive manufacturing technology // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016, vol. 89, pp. 3651-3660. DOI: 10.1007/s00170-016-9335-4.
3. Kumar L.J., Nair C.G. Current Trends of Additive Manufacturing in the Aerospace Industry // *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*. Springer Singapore. 2016, pp. 39-54. Doi: 10.1007/978-981-10-0812-2_4.
4. Huang S.H., Liu P., Mokasdar A., Hou, L. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013, vol. 67, no.5-8, pp.1191-1203. DOI: 10.1007/s00170-012-4558-5.
5. Duballet R., Baverel O., Dirrenberger J. Classification of building systems for concrete 3D printing // *Automation in Construction*. 2017, no. 83, pp. 247-258.
6. Mehmet S., Yusuf C.K. 3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM // *Energy Procedia*. 2017, no. 134, pp. 702-711.
7. ГОСТ Р 27.302-2009. Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 декабря 2009г. №1249-ст: дата введения 2010-09-01. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293814/4293814089.htm>.
8. Inozemtcev A., Duong T.Q. Technical and economic efficiency of materials using 3D-printing in construction on the example of high-strength lightweight fiberreinforced concrete // *E3S Web of Conferences*. 2019, vol. 97, p. 02010.
9. Зеленцов Л.Б., Маляян Л.Д., Пирко Д.В., Аль-Саррай И.Х., Саид Ю.С., Эффективность применения технологий с использованием 3D-принтера в строительстве // *Строительное производство*. – 2022. – №3. – С. 66-72.
10. ГОСТ 31108-2003. Цементы общестроительные. Технические условия: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 4 августа 2020г. № 453-ст: дата введения 2021-03-01. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/73873/>
11. ГОСТ 24211-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 апреля 2010г. № 70-ст: дата введения 2011-01-01. – URL: <https://www.internet-law.ru/gosts/gost/49182/>
12. ГОСТ Р 57359-2016. Конструкции бетонные. Правила изготовления: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 декабря 2016г. N 2029-ст: дата введения 2017-07-01. – URL: <https://www.internet-law.ru/gosts/gost/64199/>
13. ПНСТ 495-2020 Строительные работы и типовые технологические процессы. Аддитивные технологии. Применение трехмерной печати (3D-печать) в строительстве. Общие требования: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 ноября 2020г. N 111-пнст: Дата введения с 2021-01-01 до 2024-01-01. – URL: https://allgosts.ru/93/020/pnst_495-2020.

References

1. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylina I.N. Additive technologies in mechanical engineering: Study guide. – SPb.: SPbGU, 2013. – 221 p.
2. Chen Lian, He Yong, Yang Yingxin, Niu Shiwei, Ren Haitao. The research status and development trend of additive manufacturing technology // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016, vol. 89, pp. 3651-3660. DOI: 10.1007/s00170-016-9335-4.
3. Kumar L.J., Nair C.G. Current Trends of Additive Manufacturing in the Aerospace Industry // *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*. Springer Singapore. 2016, pp. 39-54. Doi: 10.1007/978-981-10-0812-2_4.
4. Huang S.H., Liu P., Mokasdar A., Hou, L. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013, vol. 67, no.5-8, pp.1191-1203. DOI: 10.1007/s00170-012-4558-5.
5. Duballet R., Baverel O., Dirrenberger J. Classification of building systems for concrete 3D printing // *Automation in Construction*. 2017, no. 83, pp. 247-258.
6. Mehmet S., Yusuf C.K. 3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM // *Energy Procedia*. 2017, no. 134, pp. 702-711.

7. GOST R 27.302-2009. Reliability in engineering. Fault tree analysis: approved and put into effect by the order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology from December 15, 2009 № 1249-st: date of introduction 2010-09-01. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293814/4293814089.htm>.
8. Inozemtcev A., Duong T.Q. Technical and economic efficiency of materials using 3D-printing in construction on the example of high-strength lightweight fiberreinforced concrete // E3S Web of Conferences. 2019, vol. 97, p. 02010.
9. Zelencov L.B., Mailyan L.D., Pirko D.V., Al-Sarray I.H., Saeed Yu.S., Efficiency of Applying Technologies Using a 3D Printer in Construction // Construction manufacturing. 2022, no. 3, pp. 66-72.
10. GOST 31108-2003. Cements for general construction. Technical conditions: approved and put into effect by the order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology from August 4, 2020 № 453-st: date of introduction 2021-03-01. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/73873/>
11. GOST 24211-2008. Additives for concrete and mortars. General technical conditions: approved and put into effect by the order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology from April 29, 2010 № 70-st: date of introduction 2011-01-01. – URL: <https://www.internet-law.ru/gosts/gost/49182/>
12. GOST P 57359-2016. Concrete structures. Rules for manufacturing: approved and put into effect by the order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 13, 2016. N 2029-st: date of introduction 2017-07-01. – URL: <https://www.internet-law.ru/gosts/gost/64199/>
13. PNST 495-2020 Construction works and standard technological processes. Additive technologies. Application of three-dimensional printing (3D printing) in construction. General requirements: approved and enacted by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology of November 11, 2020 N 111-pnst: Date of introduction from 2021-01-01 to 2024-01-01. – URL: https://allgosts.ru/93/020/pnst_495-2020.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Васильев Ярослав Владимирович – кандидат технических наук, доцент	Vasilev Yaroslav Vladimirovich – candidate of technical sciences, associate professor
Гусева Анастасия Валерьевна – аспирант makarov_sibsiu@mail.ru	Guseva Anastasiia Valerevna – postgraduate student

Получена 29.11.2023