

## АННОТАЦИЯ

Диссертационной работы на тему:

### «Разработка и проектирование механизмов машин для послойной железобетонной заливки»

представленной на соискание степени доктора философии (PhD)  
по специальности 6D071200 – машиностроение

**Сагынтай Мухагали Каратайулы**

**Актуальность работы.** Аддитивные технологии в строительстве, включая 3D-печать бетоном, рассматриваются как новая технология, которая может заменить или служить альтернативой традиционным методам. Для этого механические свойства 3D-печатного бетона должны быть сопоставимы с механическими характеристиками железобетона, изготовленного по традиционным строительным методам. Следовательно, 3D-печатный бетон должен быть армирован стандартной стальной арматурой, как и традиционный железобетон. На сегодняшний день наиболее актуальной задачей является армирование 3D-печатного бетона стандартной стальной арматурой. В настоящее время это армирование выполняется вручную, что оказывает негативное влияние на автоматизацию строительного процесса, являющегося ключевым преимуществом аддитивных технологий по сравнению с традиционными методами. Для автоматизации процесса армирования 3D-печатного бетона необходим специальный механизм, который бы автоматизировал создание арматурной сетки непосредственно в процессе печати. На данный момент такой механизм отсутствует, что предполагает необходимость его разработки, проектирования, испытания и подготовки к производству.

Поскольку реология 3D-печатного бетона отличается от традиционного жидкого бетона, возникает проблема интеграции арматурной сетки, создаваемой автоматическим армирующим механизмом. Эта проблема усугубляется тем, что арматурная сетка создаётся в процессе 3D-печати, следовательно, только часть арматурной сетки должна быть интегрирована в бетон, в то время как оставшаяся часть должна оставаться сухой для последующей сварки следующей части арматуры. Для этого необходимо разработать специальное сопло, которая позволит интегрировать часть арматурной сетки в бетон, оставляя другую часть сухой.

Автоматический армирующий механизм, а также специальное сопло имеют значительный вес для установки на порталные, серийные роботы и другое роботизированное оборудование, которые являются строительными 3D-принтерами. Кроме того, такие строительные 3D-принтеры предъявляют высокие требования к условиям окружающей среды и чистоте. Поэтому их зачастую необходимо изолировать от неблагоприятных условий окружающей среды, что приводит к дополнительным расходам. В настоящее время в мире наблюдается тенденция к адаптации строительной техники (автобетононасосов, экскаваторов и др.) для работы в качестве строительных 3D-принтеров. Такие адаптированные 3D-принтеры обладают хорошей грузоподъёмностью, устойчивостью к динамическим нагрузкам, а также не боятся неблагоприятных условий окружающей среды. Однако у них также есть недостатки, в частности, недостаточная точность позиционирования печатной головки по заданной траектории. Отклонение печатной головки от заданной траектории делает невозможной 3D-печать бетона. Для устранения этого недостатка актуальной задачей является исследование и проектирование дополнительного компенсирующего механизма между последним звеном стрелы строительной техники и печатной головкой.

**Цель работы** – исследование, проектирование и создание автоматического армирующего механизма машины для послойной заливки железобетона, специальное сопло для интеграции арматурной сетки в бетон, а также компенсирующего механизма.

**Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:**

- исследовать и разработать автоматический армирующий механизм, создающий арматурную сетку из стандартной стальной арматуры в процессе 3D-печати;

- исследовать и разработать специальное сопло, которая позволяет интегрировать часть арматурной сетки в бетон, оставляя другую часть сухой для дальнейшего создания арматурной сетки;

- исследовать и разработать компенсирующий механизм для компенсации отклонения печатной головки от заданной траектории, устанавливаемый на последний сегмент стрелы строительной техники, адаптированной для работы в качестве строительного 3D-принтера.

**Область исследования** – технология 3D-печати в строительстве.

**Объект исследования** – механизмы машины для послойного заливки железобетона.

**Предмет исследования** – автоматический армирующий механизм, специальная сопло и компенсирующий механизм.

**Теоретическая и методологическая основа исследования.** В ходе исследования использовались прямые и обратные задачи кинематики, параметрическое моделирование, методы оптимизации, компьютерное моделирование механического воздействия на основе конечного элементного анализа и т. д.

**Эмпирическую базу исследования составили следующие экспериментальные исследования:** определение соответствия прочности арматурной сетки, созданной в автоматическом армирующем механизме, требованиям стандарта DIN 488-4; проверка интеграции арматурной сетки в бетон методом рентгеновского сканирования 3D-печатного образца, а также визуальная проверка путем поперечного и продольного разреза образца по направлению печати.

**Научная новизна работы определяется следующими результатами:**

- разработан и испытан прототип автоматического армирующего механизма, способного в процессе 3D-печати изготавливать арматурную сетку с прочностью в соответствии с требованиями стандарта DIN 488-4;

- разработан и испытан прототип специального сопла, способный интегрировать в бетон арматурную сетку, созданная автоматическим армирующим механизмом;

- интеграция армирующей сетки доказана методом рентгеновского сканирования 3D-печатного образца, а также визуальным осмотром образца путем разрезания перпендикулярно и параллельно направлению печати;

- разработан компенсирующий механизм, обеспечивающий точность в соответствии с требованиями стандарта DIN 18202-2013, компенсирующий отклонение от заданной траектории печатающей головки, устанавливаемой на последнем звене стрелы строительной техники, приспособленной для работы в качестве строительного 3D-принтера.

**Положения, выносимые на защиту:**

- доказано, что компенсационный механизм, устанавливаемый на конечную секцию стрелы строительной машины, адаптированной для работы в качестве строительного 3D-принтера, способен обеспечивать точность, соответствующую стандарту DIN 18202-2013, компенсируя отклонения печатной головки от заданной траектории.

- установлено, что автоматизированный механизм армирования, предназначенный для армирования 3D-печатаемого бетона с помощью стандартных стальных арматурных стержней, способен создавать арматурную сетку со скоростью 5 м/мин в процессе 3D-печати.

- доказано, что автоматизированный механизм армирования и специальное сопло обеспечивают качественную интеграцию арматурной сетки в бетон, позволяя печатать железобетонные конструкции объемом 2,25 м<sup>3</sup> в час. Это эквивалентно железобетонной стене длиной 5 м, высотой 3 м и толщиной 150 мм.

**Вклад диссертанта в подготовку публикаций.** По результатам диссертационного исследования опубликовано 5 работы, отражающие основные положения исследования, в том числе 1 статья в журнале (перцентиль 97), входящих в базы данных Scopus, 3 статьи в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества Министерства науки и

высшего образования Республики Казахстан, и 1 статья в других научных журналах и изданиях.

*Работы, опубликованные в журналах, входящих в базы Scopus и Web of Science:*

1. Azamat Mustafa, Florian Storch, Kairov Rustem, Paul Plashnik, Frank Will, Sagyntay Mukhagali, Zhumadil Baigunchekov, Volker Waurich, “Compensation Manipulator for Concrete 3D Printing Based on the CONPrint3D”, ES Materials and Manufacturing (SCOPUS, Процентиль: 97)

*Список статей в изданиях, представленных Комитетом по обеспечению качества Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан:*

1. Мұхағали Сағынтай, Азамат Мустафа, Ерік Нұғман. 3D баспаланған бетонды арматуралауға арналған аутоматты арматуралаушы механизм. Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ хабаршысы. Техникалық ғылымдар және технология сериясы, № 4/2023 , Астана 2023.

2. Сағынтай М.Қ., Мустафа А.Қ., Акшулаков К.Ж. Әскери мақсаттағы құрылыс объектілерін салуға арналған құрылыс 3D принтері мен оның баспа бастиегінің тұжырымдамасы. Ұлттық қорғаныс университетінің Хабаршысы ғылыми-білім беру журналы, № 1 (100), Астана 2024.

3. Сағынтай М.Қ., Мустафа А.Қ., Аддитивті технологияда қолданылатын арматуралық сырықтардың дәнекерлеу кезіндегі қызуын зерттеу. «Қазақстан ғылымы мен техникасы» ғылыми журналы, № 3 (2024), Павлодар 2024

*Статьи опубликованы в других научных журналах и изданиях:*

1. Сағынтай М., Байгунчеков Ж. Бетонды қабаттап құятын 3d принтерлердің конструкцияларын талдау // Engineering Journal of Satbayev University. – 2021. – Т. 143(1). – Б. 120–127. <https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.v143.i1.16>

**Структура и объем диссертации.** Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы.