

УДК 69.057.5

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/43/31>

РОБОТИЗИРОВАННАЯ ТКАНЕВАЯ ОПАЛУБКА НУПАР ДЛЯ СОЗДАНИЯ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ ПАРАБОЛОИДНЫХ ПАНЕЛЕЙ

©*Быстрова А. С.*, ORCID: 0000-0003-4015-914X, Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, bystrova22@gmail.com

©*Дембовский Н. Д.*, ORCID: 0000-0003-2054-0090, Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, happyter@mail.ru

©*Дедяев Д. Е.*, ORCID: 0000-0003-0604-3805, Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, Denisdde@yandex.ru

©*Зенкин П. В.*, ORCID: 0000-0003-3479-1990, Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, pz2603@mail.ru

©*Вакуров А. Е.*, ORCID: 0000-0001-7439-6122, Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, ar.vakurov@yandex.ru

HYPAR ROBOTIC FABRIC FORMWORK FOR CREATING HYPERBOLIC PARABOLOID PANELS

©*Bystrova A.*, ORCID: 0000-0003-4015-914X, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, bystrova22@gmail.com

©*Dembovskii N.*, ORCID: 0000-0003-2054-0090, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, happyter@mail.ru

©*Dedyayev D.*, ORCID: 0000-0003-0604-3805, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, Denisdde@yandex.ru

©*Zenkin P.*, ORCID: 0000-0003-3479-1990, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, pz2603@mail.ru

©*Vakurov A.*, ORCID: 0000-0001-7439-6122, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, ar.vakurov@yandex.ru

Аннотация. Представлен анализ по использованию изменяемой тканевой опалубке. Проект НУПАР — результат деятельности исследовательской студии дизайна в Мельбурнском университете в Австралии. Рассмотрены преимущества и недостатки данной системы, а также области применения и перспективы развития в гражданском строительстве. Проведен анализ публикаций российских и зарубежных авторов. Рассматривается метод проверки, используемого для подтверждения точности результата. Цель работы — определение практической значимости в современном строительстве нового материала. В работе подробно представлена оценка и даны сведения по ограничению и перспективам использования. В заключении делается вывод о том, что метод изготовления обещает уменьшить отходы и ручной труд в строительстве сложных дважды изогнутых панелей. Использование такой опалубки является эффективным средством конструирования.

Abstract. An analysis of the use of variable formwork is given. The HYPAR project is the result of a design research studio at the University of Melbourne in Australia. The advantages and disadvantages of this system, as well as the scope and development prospects in civil engineering, are considered. Analyzed articles of Russian and foreign authors. The verification method used to confirm the accuracy of the result is considered. The purpose of the work is to determine the practical significance in the modern construction of new material. The paper presents an assessment in detail and provides information on the limitations and prospects for use. In conclusion, it is concluded that the manufacturing method promises to reduce waste and manual labor in the

construction of complex double-curved panels. The use of such formwork is an effective means of construction.

Ключевые слова: тканевая опалубка, гибкая опалубка, роботизированное бетонирование, литье гиперболических параболоидных панелей, гипар.

Keywords: fabric formwork, flexible formwork, robotic concreting, casting of hyperbolic paraboloid panels, HYPAR.

Бетонирование литьем является одним из наиболее широко используемых методов строительства [1]. С появлением более совершенных методов вычислений и сложной геометрии в конструкциях, традиционные методы литья с использованием жесткой опалубки стали преградой в удовлетворении потребностей строительства. Последние исследования в области литья с использованием цифровых методов в основном используют фрезерование несъемной опалубки [2] или пресс-формы [3]. Ряд гибких конструкций опалубки для железобетона был исследован с использованием роботизированных технологий опалубливания со скольжением и многоточечных систем [4]. Однако, традиционную жесткую опалубку можно заменить гибкой тканью; этот метод был изучен различными исследователями [5–7], а также коммерческими организациями [8]. Привлекательность этой системы заключается в ее эстетичности и возможности повторного использования опалубки, что позволяет сократить расходы при проектировании. Тем не менее, существует лишь небольшое количество исследований в области бетонирования с применением ткани и роботизированных манипуляторов для изготовления панелей с изменяемой геометрической формой.

В этой статье обсуждается проектирование и изготовление опалубки с изменяемой гибкой тканью, включающее использование 6-осевого роботизированного манипулятора. Проект, получивший название HYPAR, является результатом исследовательской студии дизайнера в Мельбурнском университете. Студия использует метод возведения «снизу–вверх», они исследовали систему бетонирования с изменяемой формой и возможностью создания неплоской четырехсторонней панельной системы, основанной на геометрии гиперболического параболоида с использованием гибкой тканевой опалубки.

Интерес именно к гиперболическим параболоидам (гипарам) вызван в связи с тем, что такая форма конструкции является наиболее экономичной по расходованию материалов по сравнению с другими пространственными конструкциями (не более $0,05 \text{ м}^3$ железобетона на 1 м^2 покрытия). Также такая форма позволяет оставить верхние узлы покрытия без опор, что дает возможность для проектирования больших пролетов [9].

Результатом стала серия литых панелей (Рисунок 1) с использованием формовочной штукатурки, из которых образец номер 8 обладает лучшим качеством и используется для оценки точности изготовления в дальнейшем. В данном проекте в процессе изготовления использовался гипс вместо бетона для облегчения литья и уменьшения веса. Это, естественно, сделало панели более хрупкими и менее прочными по сравнению с бетонными.

Использование робототехники при бетонировании. HYPAR

Во время исследований в области литья было протестировано использование промышленных роботов-манипуляторов для различных видов опалубки с целью исследования новых методов. Хотя исследований в этой области недостаточно много, все же два ключевых проекта имеют отношение к данной статье. Первый — это проект Robotic

Slipforming, осуществляемый ETH Zurich, в котором роботизированная рука использовалась при бетонировании цилиндрической колонны с опалубкой, которую поворачивали и удлиняли по высоте, чтобы образовать колонны с двойной изогнутостью [1]. Второй — это Fabric Form, разработанная в UCLA (Лос-Анджелес, Калифорния), в которой использовались две роботизированные руки для растягивания тканевой опалубки в соответствии с заданной геометрией [10]. В обоих проектах роботизированная рука использовалась в качестве основного устройства для создания формы опалубки. Здесь возможности производства, обусловленные строением роботизированной руки, создали набор определенных правил, которые могли бы стать движущей силой нового [11].

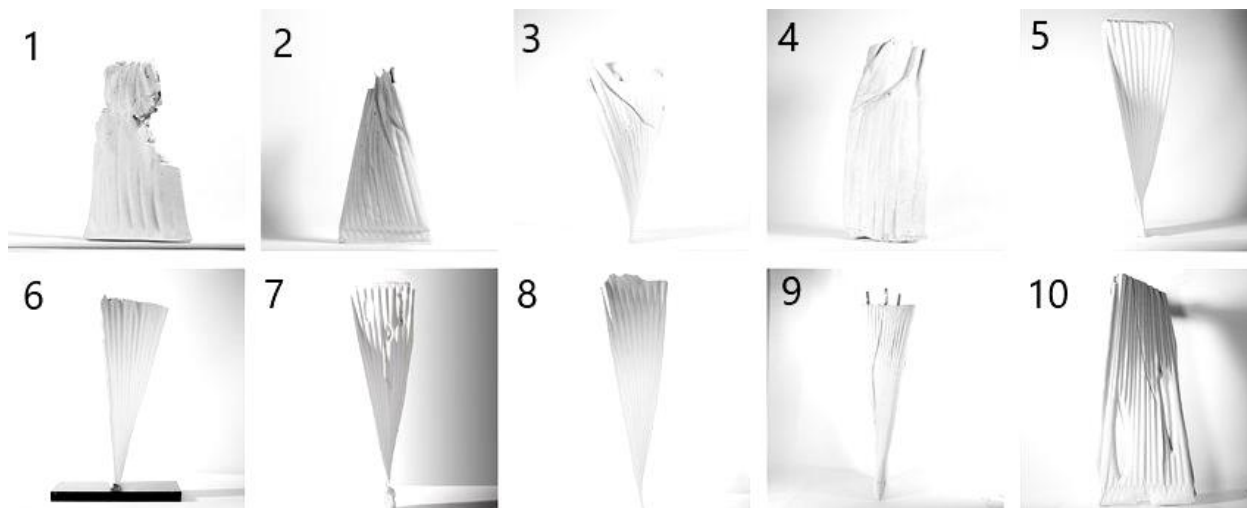


Рисунок 1. Литые панели, полученные в результате испытаний тканевой опалубки (<https://clck.ru/GXx5R>).

Геометрия, создаваемая HYPAR, основана на гиперболическом параболоиде (дважды изогнутой седловидной линейчатой поверхности). В архитектурном дизайне эта геометрия широко использовалась, особенно в работах Антония Гауди [12]. Подобная геометрия также использована в конструкции крыши собора Святой Марии в Сан-Франциско Пьером Луиджи Нерви. В данной конструкции восемь гиперболических параболоидов используются для создания пространственного преобразования из квадрата на плане в крест на вершине крыши.

Есть три важные характеристики гиперболического параболоида, которые имеют решающее значение при проектировании. Во-первых, для любой поверхности существует только одна прямая, лежащая на этой поверхности, которая будет давать точку опоры [12]. Эта прямая называется преобладающей. Гиперболический параболоид в любой точке на поверхности имеет две прямые, проходящие через нее, делающие поверхность двускатной. Это геометрическое свойство делает гиперболический параболоид устойчивым к нагрузкам в двух направлениях [13], но, что более важно, преобладающие прямые (прямые на поверхности или края этой поверхности) могут соединяться материалом, который пригоден для изготовления нужной геометрической формы.

Во-вторых, не все поверхности являются развертываемыми. Гиперболические параболоиды, исследуемые в HYPAR, представляют собой квадратные поверхности, которые не могут быть развернуты, так как направляющая состоит из не вращающихся трубок [14]. Несмотря на такой характер поверхности, эту геометрию «искривленной линейной поверхности» можно создать по четырем углам квадратной поверхности. В HYPAR сократили количество углов до двух противоположных краев в качестве основных.

В-третьих, характер геометрии допускает возможность соединения гиперболических параболоидных панелей по их краям. Дополнительная характерная особенность этой геометрии, как отметил Берри [12], заключается в том, что она может быть фрагментирована на отдельные компоненты, которые при объединении могут образовывать бесшовную поверхность.

НУРАР спроектирован как изменяемая тканевая опалубка, управляемая с помощью 6-осевой роботизированной руки. На Рисунке 2 показана конфигурация актуальной его итерации. Эта форма используется для отливки панелей шириной 300 мм, длиной 900 мм и толщиной 50 мм.

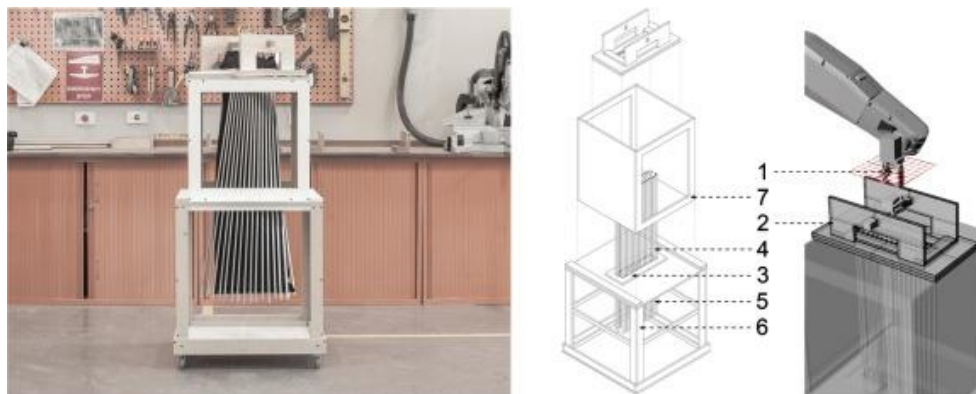


Рисунок 2. Устройство механизма: 1 — пневматический захват, 2 — верхний зажим, 3 — нижний зажим, 4 — направляющие, 5 — тканевая опалубка, 6 — каркас, 7 — временная рама (<https://clck.ru/GXxLi>).

Форма состоит из следующих частей, каждая из которых соответствует номеру, показанному на Рисунке 2:

1) Сделанный на заказ рабочий орган, прикрепленный к манипулятору, представляющий из себя модифицированный пневматический захват с парой зубцов из АБС-пластика. Пара противоположных зубцов была зафиксирована на верхнем зажиме (2).

2) Верхний зажим. Фрезерованная МДФ-панель с парой зажимов, где тканевая опалубка и алюминиевые трубы крепятся к горизонтальной плите. Ширина панели задана заранее, но форму можно адаптировать для увеличения или уменьшения ширины.

3) Нижний зажим. Фрезерованная МДФ-панель с прорезью, выступающей в качестве направляющей для несущих алюминиевых труб. Ширина внизу панели может изменяться, как и у верхнего зажима.

4) Направляющие. 30 штук полых алюминиевых трубок длиной 1 метр диаметром 20 мм. Трубки соединены штифтом в верхнем зажиме (2), но не ограничены снизу, что обеспечивает определенное перемещение и вращение, а также изменения длины (L) панели. Ограничение длины составляет $388 \text{ мм} < L < 900 \text{ мм}$. Направляющие гиперболической параболоидной поверхности используются для создания основы для гибкой тканевой опалубки; жесткое закрепление направляющих является контролируемым параметром для придания необходимой толщины панели.

5) Тканевая опалубка. Используемая ткань представляет собой смесь из 95% полиэстера и 5% лайкры. Ткань шита в прямоугольный карман. Он располагается между направляющими и зажимается сверху отверстием, позволяющим заливать раствор.

б) Каркас. Фрезерованный каркас из МДФ и древесины хвойных пород, поддерживающий нижний зажим. Его цель — обеспечить статичное положение для создания формы.

7) Временная рама. Рама снимается после того, как роботизированный манипулятор зацепляется с пресс-формой через рабочий орган (1).

Для всех панелей нижний край тканевой опалубки (5) фиксируется в одном месте на нижнем зажиме (3), но высота, поворот и наклон верхнего зажима (2) могут варьироваться каждый раз, делая таким образом опалубку многоцветной и изменяемой.

При разработке этой изменяемой тканевой опалубки были изготовлены, испытаны и улучшены пять итераций конструкции. Первая была разработана с устройством ручного ввода для получения фундаментального принципа гиперболической параболоидной отливки с помощью гибких кабелей вдоль ткани, чтобы сохранить управление поверхностью. После успешного выполнения ручной заливки был разработан интерфейс робота, чтобы соединить опалубку с 6-осевым манипулятором. В исследовании использовался ABB IRB 1200-5/0,9 с вылетом 901 мм и полезной нагрузкой 5 кг.

Существенное улучшение системы было сделано, когда эластичные направляющие были заменены на систему жестких труб, ограниченных в одном направлении. Использование жесткой системы направляющих снаружи ткани эффективно и сводит к минимуму неконтролируемое выпячивание ткани под давлением раствора. Дальнейшие улучшения в заключительной итерации были сделаны для увеличения высоты и толщины панелей. При этом возникла необходимость в более прочных направляющих для поддержки. Команда разработчиков также включила трубы в окончательный вариант и разработала возможность проектирования отверстий.

Ограничения HYPAR

Направляющие и ткань, а также параметры гиперболического параболоида, ограничивают форму конструкций. В ходе исследований были выявлены ограничения системы. Например, конструкция опалубки усложнена штифтовым соединением направляющей трубы, которая ограничивает вращение манипулятора. Кроме того, роботизированная рука, как бы она ни была гибка и точна, имеет пределы, которые были достигнуты при отливке на высоте 900 мм. Усилия по отливке более крупных и широких панелей потребовали бы роботизированных рычагов, выдерживающих большую нагрузку и соответствующих направляющих элементов, которые не изгибались бы под действием давления и веса заливаемого раствора.

В этом проекте ограничения, вызванные растяжением ткани в опалубке, были проверены и использованы для установления взаимодействия между самой опалубкой и роботизированной рукой. Это, в свою очередь, определяет архитектурный дизайн путем согласования проектных ограничений с производственной мощностью. Цифровая информация для манипулятора была сформирована в Grasshopper с помощью плагина Taso ABB и RobotStudio, это позволило команде создать траекторию движения манипулятора с учетом ограничений системы опалубки. Она находилась в зоне действия роботизированного манипулятора и перемещалась до максимального значения по осям X, Y и Z до тех пор, пока стыки не препятствовали бы углам наклона алюминиевых трубок на нижнем зажиме или пока не закончился бы охват алюминиевых трубок. Диапазон наклона составил 23,8 градуса по оси X и 32,2 градуса по оси Y. Таким образом, «граница возможностей» была установлена, как показано на Рисунке 3 и геометрия создаваемых панелей в данном случае находится в рамках изображенных размеров.

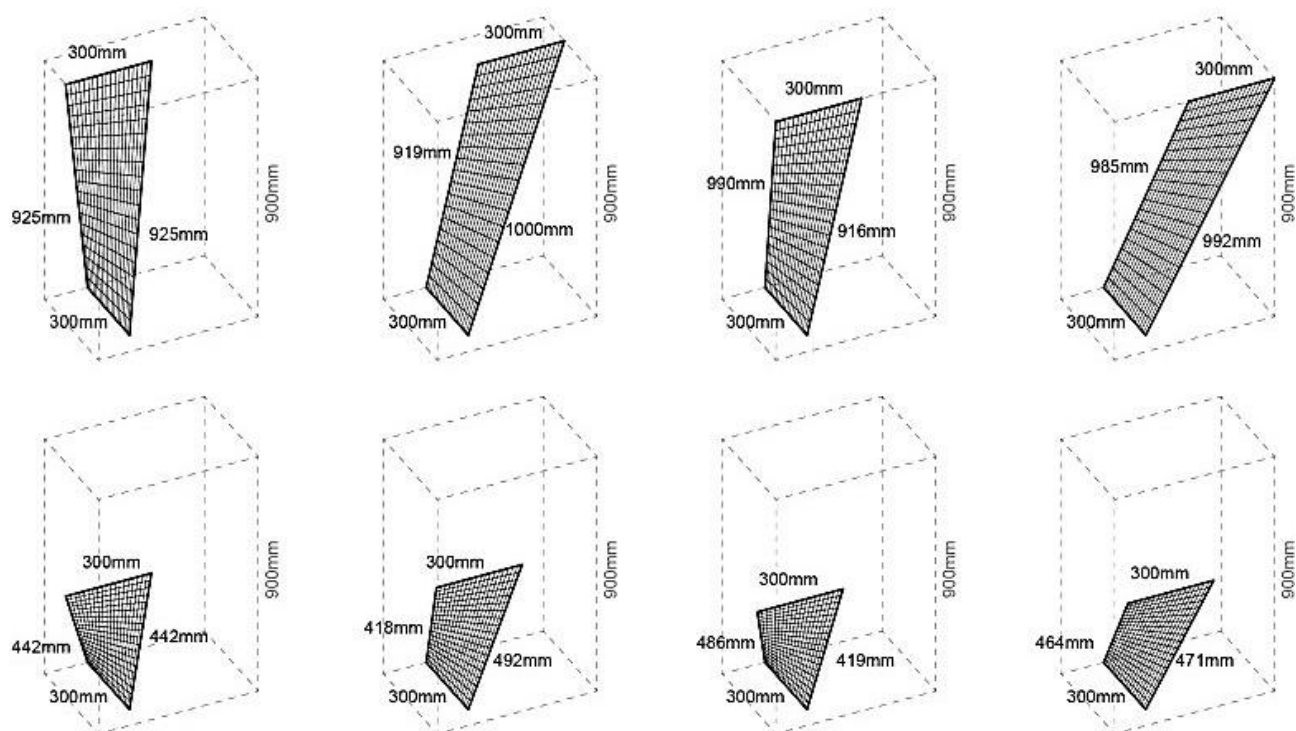


Рисунок 3. Геометрический диапазон, предоставляемых границами возможностей системы (<https://clck.ru/GXx5R>).

Оценка и будущие возможности HYPAR

Точность изготовления. В процессе литья тканевая опалубка растягивается за счет комбинации усилий [15]. Во-первых, это предварительное напряжение, когда роботизированный манипулятор перемещает верхний зажим из своего исходного положения к раме. Во-вторых, ткань растягивается при заливке раствора, что увеличивает напряжение. Хотя с каждой стороны тканевой опалубки использовались 15 алюминиевых направляющих для удержания, все еще было трудно полностью контролировать растяжение ткани, поскольку во время процесса изготовления гипсовый раствор выпирает между алюминиевыми трубками.

В Grasshopper был разработан алгоритм с плагином Kangaroo для визуализации получаемых конструкций. Гиперболические параболоидные поверхности, созданные с помощью изменения верхнего и нижнего краев, были использованы в качестве исходной геометрии для алгоритма. Давление раствора, заливаемого в данную опалубку, также учитывалось в программе.

Отклонение в поперечном сечении панели составило от 4,2 мм до 14,1 мм, тогда как отклонение поверхности — от 0 мм до 13,6 мм. Этот результат свидетельствует о том, что панели, изготовленные таким образом, могут достигать определенной степени точности, но еще не соответствуют промышленным стандартам. Например, если панель будет использоваться для строительства, отклонение должно быть в пределах $-3+11$ мм в соответствии с СП 70.13330.2012 [16].

Результаты свидетельствуют о том, что отклонения поверхности увеличиваются в направлении средней части панели и вдали от верхнего и нижнего зажимов, где ткань наименее зафиксирована.

Исследование предполагает, что в конструкцию опалубки могут быть внесены следующие корректировки для повышения точности системы:

–стыки направляющих в опорной раме должны быть универсальными и иметь возможность свободного вращения;

–расстояние между направляющими определяет размер выступов между ними. Это объясняет отклонение поверхности на 10 мм. В будущих версиях расстояние между направляющими необходимо будет уменьшить. Естественно, это ограничено универсальным шарниром на зажиме;

–распределение отклонений позволяет предположить, что к среднему сегменту опалубки из ткани необходимо добавить больше зажимов во время процесса заливки, чтобы уменьшить растяжение и коробление под давлением.

Учитывая цель исследования, стоит отметить два потенциальных способа использования. Во-первых, это способность поверхности гиперболического параболоида выступать в качестве акустического диффузора, в которой поворот отдельных поверхностей можно регулировать. Во-вторых, выпуклости, которые образуются между направляющими опалубки из-за натяжения ткани под давлением раствора, можно использовать с целью повышения архитектурной выразительности конструкций (фасадов, стен и так далее). Также, встроенные в ограждающие конструкции трубы, могут использоваться для уменьшения теплопередачи через фасады; есть возможность использовать пассивное охлаждение вместо механического охлаждения [17]. Другие исследователи изучают потенциал пористых керамических труб для поглощения воды и действия в качестве пассивных охлаждающих устройств. Потенциал этого исследования заключается и в способности бороться с эффектом городского избыточного тепловыделения [17].

НУPAR указывает на дальнейшие возможности этих методов испарительного охлаждения, встраиваемыми водопроводными трубами, которые могут выпускать воду изнутри, позволяя ей насыщать внешнюю поверхность и создавая охлаждающий эффект в сочетании с движением воздуха. Первоначальный анализ литой панели показывает, что волнистость панели обладает способностью увеличивать контакт воздуха с поверхностью, тем самым способствуя охлаждению из-за испарения.

Заключение

НУPAR предлагает новую технологию изготовления, которая объединяет роботизированный манипулятор и тканевую опалубку для производства гиперболических панелей. В настоящее время существующий прототип имеет ограничения, и исследования определяют будущую область применения такой опалубки. Процедура проектирования подчеркнула необходимость взаимодействия между роботизированной рукой и тканевой опалубкой для создания механизма непрерывной обратной связи и улучшения качества изготавливаемой продукции. Этот метод изготовления обещает уменьшить отходы и ручной труд в строительстве сложных дважды изогнутых панелей. Использование такой опалубки — это шаг к более эффективным средствам конструирования.

Список литературы:

1. Lloret K. E., Gramazio F., Kohler M., Langenberg S. Complex concrete constructions // CAADRIA. 2013. P. 613-622.
2. Lavery C. Spencer Dock Bridge // Concrete International. 2013. V. 35. №. 6. P. 28-31.
3. Sousa J. P., Martins P., de Azambuja Varela P. The CorkCrete Arch project // Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing, Proceedings of the 21st CAADRIA - Computer Aided Architectural Design Research in Asia Conference. 2016. C. 269-274.

4. Adapa - Adaptive moulds. <http://www.adapa.dk>
5. Erdine E., Kallegias A. Design by Nature: Concrete Infiltrations' // Real Time-Proceedings of the 33rd eCAADe Conference, Vienna, Austria. 2015. P. 513-520.
6. Chandler A., Pedreschi R. Fabric formwork. Riba Publishing, 2007.
7. Lloyd Thomas K. Casting operations and the description of process // The Journal of Architecture. 2015. V. 20. №3. P. 430-444. <https://doi.org/10.1080/13602365.2015.1042903>
8. Fab-Form. 2016. <http://www.fab-form.com>
9. Хан Х. Г., Коган Е. А. Теория упругости. Основы линейной теории и ее применения. Мир, 1988.
10. Culver R., Koerner J., Sarafian J. Fabric Forms: The Robotic Positioning of Fabric Formwork // Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design. Cham: Springer, 2016. P. 106-121. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26378-6_8
11. Ameijde J., Carlin B. Digital Construction: Automated design and construction experiments using customised on-site digital devices. 2012.
12. Burry M. Scripting cultures: Architectural design and programming. John Wiley & Sons, 2011.
13. Farshad M., Wildenberg M. W., Flüeler P. Determination of shear modulus and Poisson's ratio of polymers and foams by the anticlastic plate-bending method // Materials and Structures. 1997. V. 30. №6. P. 377-382. <https://doi.org/10.1007/BF02480690>
14. Pottmann H., Schiftner A., Wallner J. Geometry of architectural freeform structures // Symposium on Solid and Physical Modeling. 2008. P. 9.
15. Veenendaal D., Block P. 35 Computational form-finding of fabric formworks: an overview and discussion. 2012.
16. СП. 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87 (с изменениями 1, 3), таблица 5.12.
17. Chen W., Liu S., Lin J. Analysis on the passive evaporative cooling wall constructed of porous ceramic pipes with water sucking ability // Energy and Buildings. 2015. №86. P. 541-549.

References:

1. Lloret, E., Gramazio, F., Kohler, M., & Langenberg, S. (2013). Complex concrete constructions. *In: CAADRIA*, 613-622.
2. Lavery, C. (2013). Spencer Dock Bridge. *Concrete International*, 35(6), 28-31.
3. Sousa, J. P., Martins, P., & de Azambuja Varela, P. (2016). The CorkCrete Arch project. *In: Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing, Proceedings of the 21st CAADRIA - Computer Aided Architectural Design Research in Asia Conference*, 269-274.
4. Adapa - Adaptive moulds. <http://www.adapa.dk>
5. Erdine, E., & Kallegias, A. (2015). Design by Nature: Concrete Infiltrations'. *In: Real Time-Proceedings of the 33rd eCAADe Conference, Vienna, Austria*, 513-520.
6. Chandler, A., & Pedreschi, R. (2007). Fabric formwork. Riba Publishing.
7. Lloyd Thomas, K. (2015). Casting operations and the description of process. *The Journal of Architecture*, 20(3), 430-444. <https://doi.org/10.1080/13602365.2015.1042903>
8. Fab-Form (2016). <http://www.fab-form.com>
9. Khan, Kh. G., & Kogan, E. A. (1988). Teoriya uprugosti. *Osnovy lineinoi teorii i ee primeneniya. Mir*.
10. Culver, R., Koerner, J., & Sarafian, J. (2016). Fabric Forms: The Robotic Positioning of Fabric Formwork. *In: Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, 106-121. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26378-6_8

11. Ameijde, J. V., & Carlin, B. (2012). Digital Construction: Automated design and construction experiments using customised on-site digital devices.
12. Burry, M. (2011). Scripting cultures: Architectural design and programming. John Wiley & Sons.
13. Farshad, M., Wildenberg, M. W., & Flüeler, P. (1997). Determination of shear modulus and Poisson's ratio of polymers and foams by the anticlastic plate-bending method. *Materials and Structures*, 30(6), 377-382. <https://doi.org/10.1007/BF02480690>
14. Pottmann, H., Schiftner, A., & Wallner, J. (2008). Geometry of architectural freeform structures. *In: Symposium on Solid and Physical Modeling*, 9.
15. Veenendaal, D., & Block, P. (2012). 35 Computational form-finding of fabric formworks: an overview and discussion.
16. Svod Pravil. 70.13330.2012. Nesushchie i ograzhdayushchie konstruksii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 3.03.01-87 (s izmeneniyami 1, 3), tablitsa 5.12.
17. Chen, W., Liu, S., & Lin, J. (2015), Analysis on the passive evaporative cooling wall constructed of porous ceramic pipes with water sucking ability. *Energy and Buildings*, 86, 541-549.

Работа поступила
в редакцию 17.05.2019 г.

Принята к публикации
21.05.2019 г.

Ссылка для цитирования:

Быстрова А. С., Дембовский Н. Д., Дедяев Д. Е., Зенкин П. В., Вакуров А. Е. Роботизированная тканевая опалубка HYPAR для создания гиперболических параболоидных панелей // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. №6. С. 245-253. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/43/31>

Cite as (APA):

Bystrova, A., Dembovskii, N., Dedyayev, D., Zenkin, P., & Vakurov, A. (2019). HYPAR Robotic Fabric Formwork for Creating Hyperbolic Paraboloid Panels. *Bulletin of Science and Practice*, 5(6), 245-253. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/43/31> (in Russian).