Геоэкология и безопасность жизнедеятельности

УДК 67.15.63

ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ САМОЗАКЛИНИВАНИЕ КАК ПРИНЦИП ИНЖЕНЕРНОГО ДИЗАЙНА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МОРСКИХ И ПРИБРЕЖНЫХ СООРУЖЕНИЙ

В.Ю.ПИИРАЙНЕН[1], **Ю.З.ЭСТРИН**[2]
[1] *Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Университет Монаш, Клейтон, Австралия; Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия*

В порядке обсуждения представлена новая концепция решения проблем берегоукрепительного строительства на основе топологического самозаклинивания, которая открывает путь к получению новых сегментированных, или модульных, структур строительных элементов и конструкций. Обоснована актуальность модульного принципа проектирования, основанного на использовании природных законов гармонизации искусственно создаваемых форм. В этой концепции идея Платоновых тел получает дальнейшее развитие в поиске новых видов гармонии и практических приложений на макроуровне в конструкторско-технологической практике и инженерном дизайне. Возрастающие возможности современных строительных материалов и технологий позволяют создавать новые конструктивные системы на основе модульного принципа, одной из наиболее интересных форм которого является топологическое самозаклинивание. Этот инновационный принцип инженерного дизайна и его многочисленные преимущества рассматриваются применительно к прибрежным защитным сооружениям. Представлены варианты новых перспективных конструкций на основе топологического самозаклинивания.

***Ключевые слова*:** берегозащитные сооружения, топологическое самозаклинивание, гибридные материалы

***Как цитировать эту статью*:** Пиирайнен В.Ю. Топологическое самозаклинивание как принцип инженерного дизайна при строительстве морских и прибрежных сооружений / В.Ю.Пиирайнен, Ю.З.Эстрин // Записки Горного института. 2017. Т. 226. С. 480-486. DOI: 10.25515/PMI.2017.4.480

Введение. Общая протяженность береговой линии России, омываемой морями и океанами, составляет около 40 тыс. км. За счет разрушения берегов и их поглощения Мировым океаном эта цифра постоянно увеличивается. Особенно остро вопрос укрепления и защиты берегов стоит в прибрежных городах и населенных пунктах, где данная проблема всегда актуальна и несет серьезные экологические вызовы. Так, в начале нынешнего столетия в Санкт-Петербурге было завершено строительство комплекса защитных сооружений от наводнений, которое, наряду с реальной защитой города, принесло целый ряд проблем, связанных с изменением экосистемы акватории Финского залива из-за нарушения циркуляции естественных водных потоков. Организация дополнительных водопропускных протоков на отдельных участках дамбы на последнем этапе строительства не привела к существенному улучшению экологической ситуации. Сегодня единственным и очевидным решением проблемы является дорогостоящее осушение заболоченных участков Финского залива и создание на их месте намывных территорий.

Однако то, что еще возможно сделать в Санкт-Петербурге, вряд ли осуществимо на других прибрежных территориях, таких, например, как районы Краснодарского края на Азовском море с заболоченными берегами и огромной акваторией со средней глубиной менее 2 м и толщиной иловых отложений более 50 м. Здесь освоение прибрежных территорий требует особого подхода и учета экологических особенностей. Традиционная сплошная отсыпка скальным грунтом в данном случае малоприемлема, в связи с чем необходима новая концепция решения берегоукрепительных задач. Похожая ситуация имеет место и на северном побережье Каспийского моря, а также на значительной части южного берега Ладожского озера.

Важно понимать, что в недалеком будущем из-за всеобщего потепления и поднятия уровня Мирового океана потребуются значительные усилия и затраты на укрепление морских берегов, общая протяженность которых в мире составляет более 1 млн км. В свете сказанного, поиск путей эффективного берегоукрепительного строительства на основе новейших материалов и технологий является своевременным и актуальным.

Сегодня работами в этом направлении занимаются на кафедре материаловедения и технологии художественных изделий Санкт-Петербургского горного университета в сотрудничестве с Лабораторией гибридных наноструктурных материалов Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» и кафедрой архитектуры и дизайна Сочинского государ-

DOI: *10.25515/PMI.2017.4.480*

ственного университета. Разработана новая концепция строительства, суть которой заключается в модульном принципе проектирования и использовании технологии пошаговой укладки несущих элементов дамб или берегоукрепительных сооружений типа волноломов и тетраподов, изготовленных из гибридных высокопрочных тяжелых бетонов с органическим покрытием и связанных между собой по принципу топологического самозаклинивания. Пример геометрии блоков, позволяющей осуществить модульный дизайн берегоукрепительных сооружений, показан на рис.1.

Обоснованность такого подхода определяется тем, что современные проектные методики все активнее развиваются в направлении использования природных закономерностей и берут свое начало в области междисциплинарных исследований, направленных на гармонизацию искусственно создаваемых форм.

Обсуждение. Одной из черт современного развития в научной сфере является, наряду с переходом к наномасштабным структурам, сближение и взаимопроникновение неорганики и органического мира живой природы. Принципы биомиметики все более широко применяются в дизайне материалов и инженерных конструкций. Возврат к единой целостной картине мира стал естественным трендом в науке и открыл новый этап познания и освоения материи. Так возникли нанобиотехнологии и новые классы композиционных материалов, в том числе гибридные наноматериалы.

Понятие гибридных материалов в научном обороте появилось благодаря исследованиям австралийских ученых в области морфологии топологически самозацепленных (самозаклиненных) материалов [9, 15]. Разработанные ими принципы топологического самозацепления идеально подходят для создания гибридных материалов, позволяя смешивать разнородные (подчас несовместимые) материалы в интегрированную единую структуру, причем в любых пропорциях. В России изучением и разработкой гибридных материалов занялись относительно недавно. В рамках выполнения гранта Правительства РФ в НИТУ «МИСиС» была создана специализированная лаборатория под руководством одного из авторов этой статьи, занимающаяся вопросами разработки композиционных гибридных материалов. Там же родился новый для материаловедов термин «архиматы» – материалы с заданной внутренней архитектурой, дающий также определение самозацепленным блокам малого размера, из которых формируется и формообразуется материал макроразмерных конструкций [2]. За короткий срок лаборатории удалось получить и донести до научной общественности убедительные результаты преимуществ «немонолитных» композиций гибридных материалов, открывающие широкий путь к дальнейшим исследованиям в этой области.

В 2015 г. в Санкт-Петербургском горном университете было начато изучение возможностей практического применения принципов топологического самозацепления при строительстве объектов укрепления береговых линий г. Сочи. Для этой цели были установлены научные контакты с лабораторией «МИСиС» и Сочинским государственным университетом, подготовлены совместные публикации [5].

Как известно, визитной карточкой любого приморского города является уникальность и неповторимость его морского фасада. Сочи в этом плане пока еще не соответствует тому высокому значению, которое ему отведено в качестве главного курорта страны. Поэтому общей задачей архитекторов, дизайнеров и строителей является скорейшее устранение этого недостатка. Начать было решено с наиболее эстетически раздражающих и при этом существенно значимых берего-

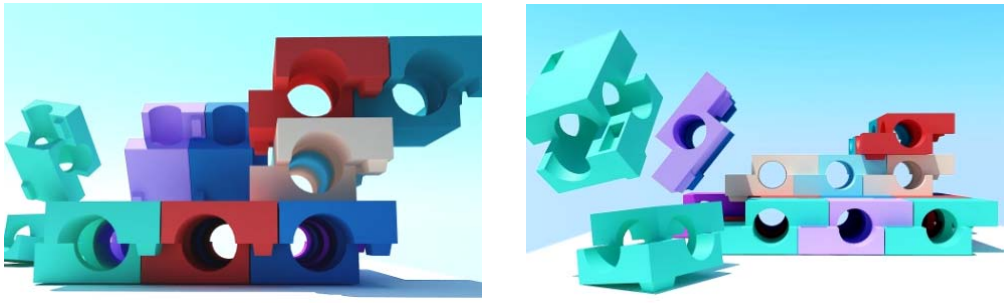


Рис.1. Пример модульных элементов для использования в берегозащитных сооружениях

защитных элементов и сооружений, таких как волноломы и тетраподы. С помощью компьютерного моделирования, модульного принципа проектирования [6], были проведены расчеты и поиски внутренней структуры материала, оптимальных форм и размеров объектов исследования для опробования и применения их в практике немонолитного, «мозаичного» формообразования из архиматов реальных макроразмеров. Разработана методика изготовления макетов элементов береговых укреплений различных конструкций, их лабораторных и стендовых испытаний.

По общему согласию участников исследований термин «самозацепление» был заменен на предложенный А.Я.Канелем-Беловым термин «самозаклинивание», как наиболее точно отражающий суть принципа соединения отдельных блоков в конструкцию. Напомним о сути блочного «самозаклинивания». Ранее сообщалось [15], что важной особенностью нового класса композиционных материалов является их немонолитность и то, что они представляют собой ансамбль из отдельных элементов – самозацепленных блоков, которые могут иметь различную форму, в том числе быть тетраэдрами, кубами или другими членами семейства так называемых Платоновых тел [15] (рис.2). Их особенность состоит в том, что они являются выпуклыми полиэдрами и контакт между ними осуществляется на плоских гранях. Самозаклиниванием они обязаны своей форме и взаиморасположению. Никаких связующих элементов или склеек для этого не требуется. Этим они радикально отличаются от блоков, представленных на рис.1, для которых используется сопряжение по принципу «ЛЕГО».

Другой тип самозаклинивающихся элементов – это так называемые остеоморфные блоки, соединение которых происходит за счет выпукло-вогнутых контактных поверхностей [9] (рис.3). При этом геометрия блоков такова, что после их сборки ни один из «кирпичиков» невозможно извлечь из сборки. Благодаря мозаичности материала увеличивается общая сопротивляемость разрушению. Изделие остается целостным и не теряет работоспособности при нагрузках, даже если при этом разрушена часть блоков, причем «толерантность» структуры к локальным повреждениям весьма высока [9]. В качестве примера приводится лист стекла длиной 2 м, который в обычном монолитном состоянии имеет возможность прогиба не более 10 %, будучи изготовленным из самозацепленных элементов, может быть согнут в трубу диаметром 636 мм [2].

Как уже отмечалось выше, принцип топологического самозаклинивания позволяет получать огромное количество разнообразных гибридных материалов. Один из вариантов такого гибрида показан на рис.4 [9].

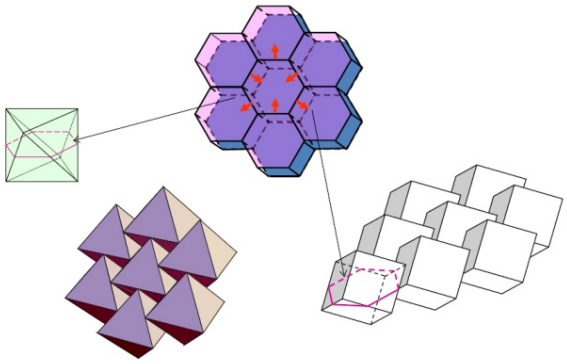


Рис.2. Примеры самозацепления Платоновых тел [3]

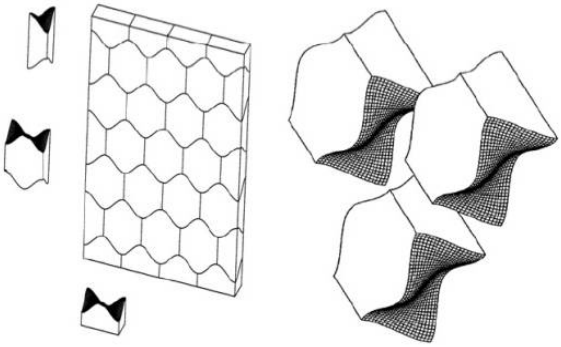


Рис.3. Сборка из остеоморфных блоков [9]

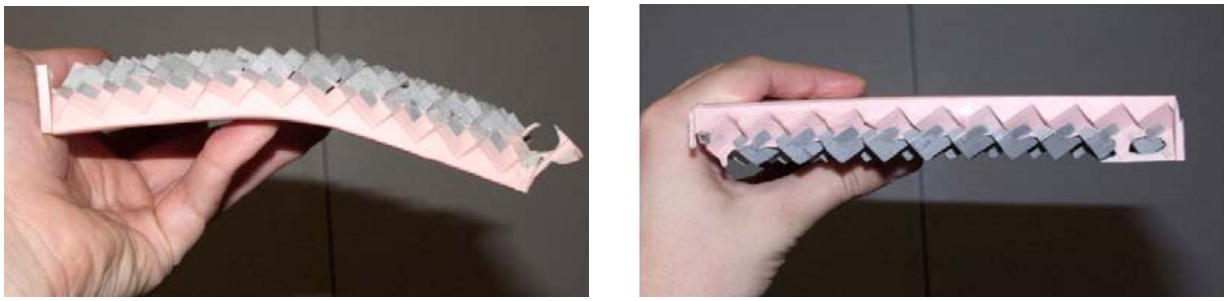


Рис.4. Гибридная структура из топологически самозацепленных металлических кубов с гибкой полимерной подложкой [9]

DOI: *10.25515/PMI.2017.4.480*



Рис.5. Примеры сегментации плоскости на геометрически простые фигуры

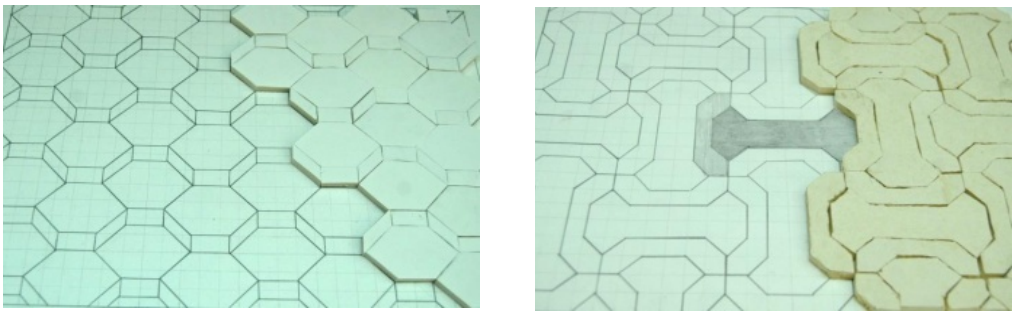


Рис.6. Построение объемной структуры из самозаклиненных блоков путем трансформации тесселяции исходной плоскости при переходе на параллельные ей плоскости вдоль нормали

Безусловно, получение описанных преимуществ гибридных материалов на макроуровне требует применения особых технических приемов и дизайн-решений построения внутреннего пространства и тела изделия. И здесь одних знаний эвклидовой геометрии недостаточно. При разработке дизайна и расчете конкретных изделий, в частности несущих элементов гидросооружений, необходимо учитывать все виды внешних воздействий, оказываемых на конструкцию в процессе эксплуатации, и ее пространственное расположение относительно направлений основных нагрузок. Можно смело сказать, что такая работа по сути всегда будет уникальной, так как уникальны условия и среда эксплуатации изделия в каждом конкретном случае. А поскольку проблемы берегового укрепительного строительства носят глобальный характер, то сегодня крайне актуальным является формирование новых концепций их решения.

Одним из ключевых моментов нашей новой концепции является модульный принцип проектирования [1, 3]. Объемные элементы генерируются путем трансформации плоской модульной сетки при переходе к параллельным плоскостям вдоль их общей нормали. Математические принципы такой трансформации, приводящей к объемной структуре из самозацепленных блоков, были сформулированы в работе [12]. При формальном проектном поиске плоская метрическая сетка может формироваться из простых геометрических фигур или их комбинаций (рис.5). Эволюция элементарных плоских модулей, использованных в данной работе, при движении в направлении, перпендикулярном исходной плоскости, проиллюстрирована на рис.6.

Вертикальное построение объемов осуществляется с учетом соприкосновения формируемых блоков по сторонам. При этом задаются условия, при которых модули «удерживают» друг друга. Таким образом, формируется своеобразная композиционная структура с конструктивной предопределенностью, в которой учет гравитационных характеристик взаимодействия отдельных модульных элементов (блоков) при вертикальном развитии переводит заданный в исходной плоскости мотив в самозаклиненную пространственную структуру [4]. Сегментация, или тесселяция, плоскости может осуществляться различными способами. Так, тесселяция на квадраты или правильные шестиугольники приводит к слою самозацепленных Платоновых тел [12]. Возможности других вариантов тесселяции, включая мозаики Пенроуза, исследованы в работе [17].

Таким образом, пространственный поиск на основе геометрической модульности переходит в строго формализованное проектирование. Можно сказать, что в этом случае форма возникает в процессе проектирования [6]. Так как мотив тесселяций, задаваемых в исходной плоскости, допускает огромное количество вариаций, данная методика позволяет вводить в архитектурно-

DOI: *10.25515/PMI.2017.4.480*

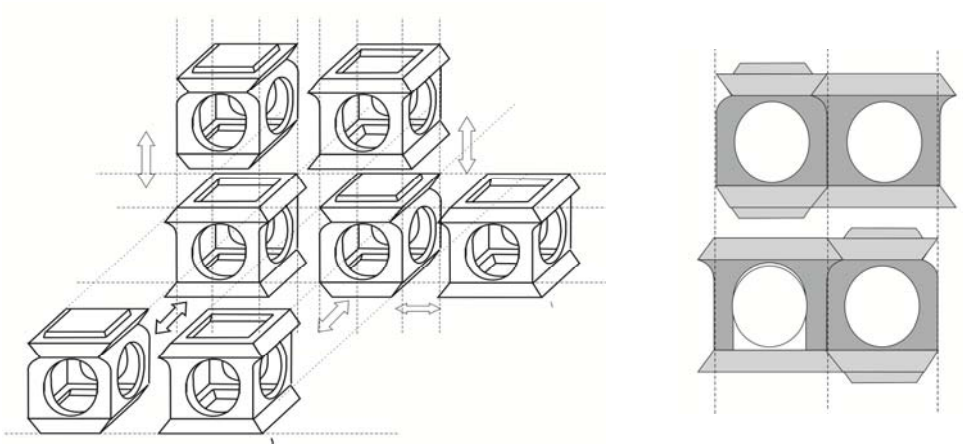


Рис.7. Пример элементарных блоков-модулей, позволяющих самозаклинивание

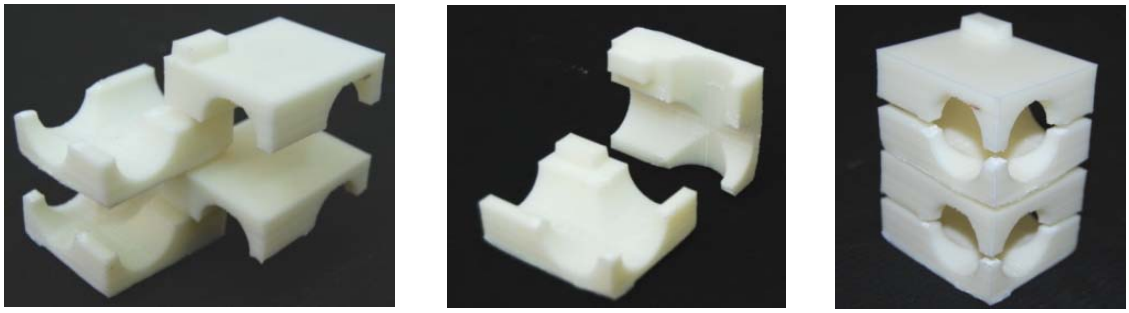


Рис.8. Пример модельных блоков для берегозащитных сооружений, изготовленных методом трехмерной печати

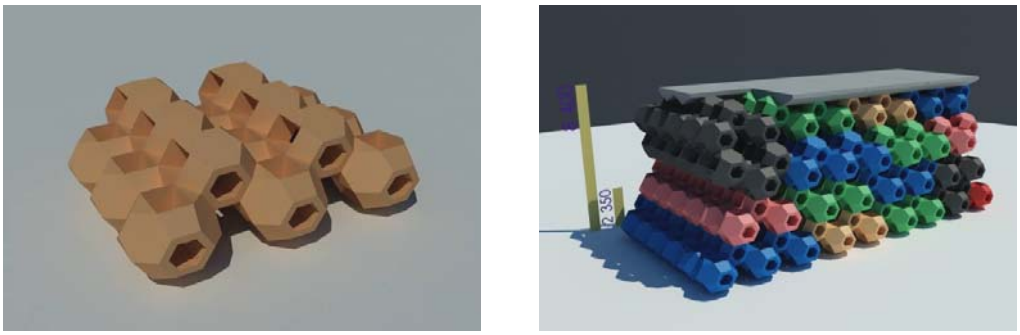


Рис.9. Дизайн модульной сборки блоков, обеспечивающих свободную циркуляцию водных потоков

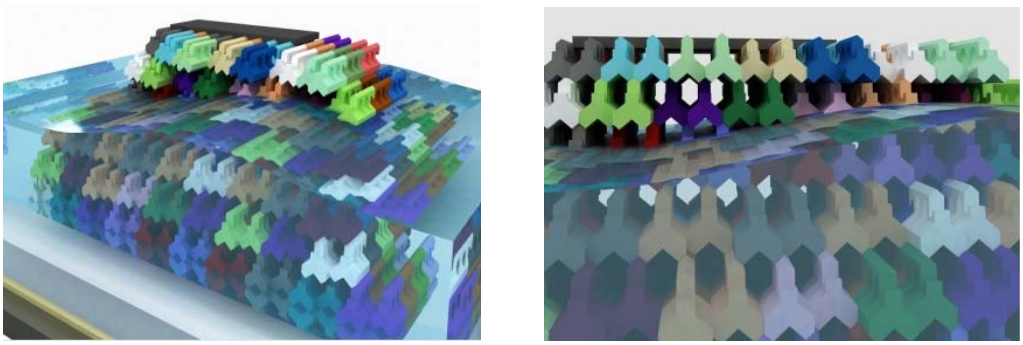


Рис.10. Сборка из модульных блоков, плакированных мягкими полимерными покрытиями

дизайнерскую практику новые параметры и многообразие пластики форм [11, 16, 17]. На рис.7 представлены схематическое и объемное изображения модульных блоков с элементами самозаклинивания [4]. (Отметим, что их геометрия не подпадает под определение топологически самозаклинивающихся элементов, данное в работе [13]).

Бурное развитие технологий трехмерной печати необычайно расширяет возможности инновационного дизайна, в частности, применительно к берегозащитным сооружениям. На рис.8 в качестве примера представлены спроектированные и напечатанные на 3D-принтере модули для решения задач берегоукрепления.

Специфика зацепления блоков позволяет создавать объемно-пространственные композиции, обеспечивающие свободную циркуляцию водных потоков при строительстве подводной части берегоукрепительных сооружений. На рис.9 представлен один из вариантов дизайна модульной сборки блоков, обеспечивающих, помимо основной несущей функции, свободную циркуляцию водных потоков во всех направлениях и возможность прокладки различных коммуникаций и их обслуживание внутри сооружения.

Еще одной особенностью новой концепции является использование при изготовлении и сборке модульных блоков гибридных тяжелых бетонов в сочетании с органическими полимерными покрытиями. При этом предполагается использование бетонов на основе магнезиальных цементов, обладающих уникальной способностью упрочняться в морской воде. Плотность таких бетонов зависит от вида наполнителя и достигает у бетонов с магнетитовым наполнителем значения 4000 кг/м^3, а с чугунной дробью или металлургическим скрабом – 5000 кг/м^3.

Повышение прочности бетона на сжатие (до 200 МПА), водонепроницаемости, морозостойкости и, как следствие, долговечности обеспечивается пропиткой бетона мономерами и полимерами органического происхождения.

Плакирование модульных блоков мягкими полимерными покрытиями обеспечит их эффективную сборку и надежность в эксплуатации (рис.10). В работе [10] было продемонстрировано повышение несущей способности и сопротивляемости разрушению сборок из жестких остеоморфных блоков с мягкими прослойками. Дальнейшие усовершенствования конструкций из самозаклиненных блоков возможно путем армирования. В частности, представляет интерес армирование сборок из остеоморфных блоков стержнями из материалов с памятью формы [13]. При этом открывается возможность управлять изменением формы и жесткости сборки за счет внешних воздействий, например, пропуская электрический ток через армирующие стержни.

Заключение. В последние годы зарубежные архитекторы и строители оценили возможности топологического самозаклинивания как принципа инженерного дизайна [11, 16, 17], в частности, для создания берегозащитных морских сооружений. Разработки в этом направлении только начинаются. Разумеется, внедрение такого подхода в создании крупных реальных конструкций потребует проведения всесторонних испытаний в лабораторных масштабах и критической оценки правомочности перенесения их результатов в реальные условия. Однако перспективность метода топологического самозаклинивания, в сочетании с использованием новейших материалов и технологий, по мнению авторов, не вызывает сомнений и оправдывает вложения в подобного рода исследования. Этой публикацией авторы надеются привлечь внимание инженерного сообщества к новым технологическим решениям в создании берегозащитных сооружений, которые открывает описанный инновационный принцип инженерного дизайна.

Благодарность. *Авторы выражают благодарность за поддержку исследования в рамках Программы повышения конкурентоспособности НИТУ «МИСиС», грант № К2-2016-062.*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Добрицына И.А*. Новые проблемы архитектуры в эпоху цифровой культуры // Academia. Архитектура и строительство. 2013. № 4. С. 42-53.

2. *Зимина Т.* Архиматы, они же гибриды / Т.Зимина, Д.Зыков // Наука и жизнь. 2014. № 1. С. 43-44.

3. *Исаев В.В*. Фрактальность природных и архитектурных форм / В.В.Исаев, Н.В.Касьянов // Вестник ДВО РАН. 2006. № 5. С. 120-122

4. *Киба М.П.* Модульный принцип проектирования в учебном процессе // Современный дизайн и проблемы высшей школы дизайна: Материалы Международной научно-практической конференции / Московский институт дизайна. М., 2015. С. 68-70.

5. *Пиирайнен В.Ю*. Новые материалы и технологии в строительстве морских прибрежных сооружений / В.Ю.Пиирайнен, Ю.З.Эстрин // Материалы международной научно-практической конференции / Сочинский государственный университет. Сочи. 2015. С. 294-301. ISBN 978-5-88702-541-4.

6. *Поморов С.Б.*Терминология нелинейной архитектуры и аспекты ее применения / С.Б.Поморов, Д.А.Исмаилов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 3. С. 79-80.

7. A new concept in design of materials and structures: assemblies of interlocked tetrahedron-shaped elements / A.Dyskin, Y.Estrin, A.J.Kanel-Belov, E.Pasternak // Scripta Materialia. 2001. Vol. 44. P. 2689-2694.

8. Coastal protection using topological interlocking blocks / E.Pasternak, A.Dyskin, C.Pattiaratchi, E.Pelinovk*y* // EGU General Assembly. Vienna, Austria, 2013. P. 8048.

9. *Estrin Y.* Topological interlocking as a design concept / Y.Estrin, A.Dyskin, E.Pasternak // Materials Science and Engineering. 2011. № 31. P. 1189-1194.

10. Enhanced Mechanical Performance of Bio-Inspired Hybrid Structures Utilising Topological Interlocking Geometry / Lee Djumas, Andrey Molotnikov, George P.Simon, Yuri Estrin // Scientific Reports 6. 2016. Article number 26706.

11. *Fallacara G.* About Building Stereotomy: Theory and Practice / G.Fallacara, C.Calabria // Visual Computing and Emerging Geometrical Design Tools. Milan, IGI GLOBAL. 2016. P.575-607. ISBN 9781522500292.

12. Interlocking of convex polyhedra: towards a geometric theory of fragmented solids / A.J.Kanel-Belov, A.V.Dyskin, Y.Estrin, E.Pasternak, I.A.Ivanov-Pogodaev // Moscow Mathematical Journal. 2010. № 2. P. 337-342.

13. Sandwich Paneles wich a Core Segmented into Topologically Interlocked Elements / A.Molotnikov, R.Gerbrand, O.Bouaziz, Y.Estrin // Advanced Engineering Materials. 2013. № 8. P. 728-731.

14. Patent US 6884486. Structure composed of elements and method for its production / Y.Estrin, N.Muller, D.Trenke, A.Dyskin, E.Pasternak. Publ. 26.04.2005.

15. Topological interlocking of platonic solids: a way to new materials and structures / A.Dyskin, Y.Estrin, A.J.Kanel-Belov, E.Pasternak // Philosophical Magazine Letters. 2003. Vol. 83. № 3. P. 197-203.

16. *Tessmann O.* Extremely heavy and incredibly light / O.Tessmann, M.Becker // Proceeding of 18th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia. 2013. P. 469-478.

17. *Weizmann M.* Topological interlocking in architectural design / M.Weizmann, O.Amir, Y.J.Grobman // Emerging Experience in Past. Present and Future of Digital Architecture; Proceedings of the 20th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia. Hong Kong, 2015.

***Авторы*: В.Ю.Пиирайнен,** *доктор технических наук*, *профессор*, *piraynen@gmail.com* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **Ю.З.Эстрин,** *доктор*, *профессор*, *yuri.estrin@monash.edu* (*Университет Монаш*, *Клейтон*, *Австралия*; *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»*, *Москва*, *Россия*).

Статья принята к публикации 24.01.2017.