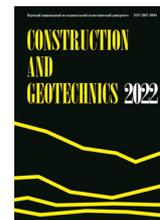




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 14, № 2, 2023

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.10

УДК 69.03

## ПРИМЕНЕНИЕ ВИЗУАЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

**Е.А. Клековкин, А.С. Сунцов**

Ижевский государственный технический университет  
имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 19 января 2023

Одобрена: 22 марта 2023

Принята к публикации:

03 июля 2023

#### Ключевые слова:

визуальное программирование, генеративное проектирование, параметрическое проектирование, алгоритмическое проектирование, Grasshopper, Дупато, оптимизация.

### АННОТАЦИЯ

Современное архитектурное и конструктивное проектирование ориентировано на использование вычислительных возможностей компьютеров и применение программного обеспечения. Ограниченные возможности программных комплексов и высокие трудозатраты на вариантную проработку решений делают актуальным вопрос автоматизации процессов проектирования. Визуальное программирование является самым доступным средством написания скрипта для автоматизации процесса проектирования в прикладных программных комплексах. Однако информация о данном инструменте в специальной литературе разрозненная и неструктурированная.

Цель данной статьи – провести обзор сфер применения визуального программирования в проектировании, систематизировать и структурировать информацию, провести сравнение с альтернативными инструментами.

Для этого проведен сбор и анализ релевантной литературы из баз данных научных публикаций. Составлена классификация подходов к проектированию, в которых применяется визуальное программирование. Предложена таксономия и определения для терминов, обозначающих такие подходы, как параметрическое, генеративное и алгоритмическое проектирование. Проведено сравнение визуального программирования с альтернативными инструментами автоматизации процесса проектирования. Выделены задачи проектирования, для которых рационально применять визуальное программирование. Перспективным направлением применения данного инструмента является создание пользовательских плагинов для программных комплексов.

© ПНИПУ

© Клековкин Евгений Алексеевич – магистрант, e-mail: z0h0e0n0y0a@gmail.com.

Сунцов Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: alexandrsun4009@gmail.com.

Evgenii A. Klekovkin – Master Student, e-mail: z0h0e0n0y0a@gmail.com.

Alexander S. Suntsov – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: alexandrsun4009@gmail.com.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

## APPLICATION OF VISUAL PROGRAMMING FOR AUTOMATION TASKS IN CONSTRUCTION

E.A. Klekovkin, A.S. Suntsov

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 19 January 2023  
Approved: 22 March 2023  
Accepted for publication:  
03 July 2023

#### Keywords:

visual programming, generative design, parametric design, algorithmic design, Grasshopper, Dynamo, optimization.

### ABSTRACT

Modern architectural and structural design is focused on the use of computational capabilities of computers and the use of software. The issue of design process automation is very urgent because of limited capabilities of software complexes and high labor costs for elaboration of solution options. Visual programming is the most accessible tool for scripting to automate the design process in applied software complexes. However, information about this tool in special literature is scattered and unstructured.

The aim of this article is to review the spheres of visual programming application in design, to systematize and structure the information and to compare it with alternative tools.

For this purpose, we collected and analyzed the relevant literature from the databases of scientific publications. A classification of design approaches in which visual programming is applied has been compiled. Taxonomy and definitions for terms denoting such approaches as parametric, generative and algorithmic design have been proposed. Comparison of visual programming with alternative tools for automating the design process has been carried out. The tasks of design, for which it is rational to apply visual programming, have been singled out. A promising direction of application of this tool is the creation of user plug-ins for software systems.

© PNRPU

---

## Введение

Современное архитектурное и конструктивное проектирование в значительной степени ориентировано на применение новых технологий для решения специфических задач строительной отрасли [1]. При этом передовые разработки в области информационного BIM-моделирования развиваются в основном за рубежом. Тем не менее эти разработки в той же степени полезны и в практике России [2].

Множество исследований последних лет касаются вопроса применения новых технологий проектирования для решения существующих проблем по сокращению сроков проектирования и принятия проектных решений. Большинство публикаций, адресующих эти проблемы, в той или иной степени касаются технологий BIM-моделирования [3–15].

Особенно интересной является возможность дополнения функционала программы путем написания кода на языке программирования в отдельной программе API (Application Programming Interface) или в среде визуального программирования. Эти три метода выступают конкурирующими, так как решают одни и те же задачи разными средствами. Ведущие программные комплексы поддерживают как возможность написания пользовательского кода через API [16, 17], так и возможность создания алгоритма через встроенную среду визуального программирования [18, 19], либо имеют возможность связи с этой средой.

С точки зрения архитектурного и строительного проектирования наиболее перспективными являются среды визуального программирования, как наиболее легкие в освоении и доступные специалистам без углубленных навыков владения написанием программного кода [20], поэтому объектом изучения в данном обзоре являются именно среды визуального программирования.

Несмотря на растущий интерес к визуальному программированию в архитектурном и строительном сообществе, материалы и публикации по данной теме достаточно разрознен-

ны и касаются решения частных вопросов узкоспециальных задач. При этом в литературе отсутствуют систематизирующие материалы, не приводится полная классификация задач, для решения которых целесообразно использование визуального программирования и других способов программирования, не проведен анализ границ рациональной применимости данных инструментов.

Цель обзора – освещение и описание возможности использования визуального программирования для решения задач строительного и архитектурного проектирования.

Для достижения цели исследования были поставлены следующие задачи:

1. Сбор и анализ релевантной литературы, касающейся применения визуального программирования в проектировании.
2. Выделение наиболее явных направлений для применения средств визуального программирования и их классификация.
3. Сравнение средств визуального программирования с альтернативными методами.
4. Выделение границ целесообразного применения средств визуального программирования как инструментов автоматизации процесса проектирования.

## **Методика**

Для решения вышеобозначенных задач был проведен обзор релевантной литературы. Для этого был составлен список терминов в предметной области поиска, которые тесно взаимосвязаны между собой. Далее по полученному списку был проведен первый этап поиска литературы в интернет-источниках: РИНЦ, ResearchGate, Elsevier, CuminCad. Составлена выборка наиболее релевантных статей из материалов с наивысшими библиометрическими показателями из базы РИНЦ [21], а также статей с наиболее релевантным наименованием из прочих источников. Второй этап поиска проводился по авторам материалов из первой выборки, а также по ссылкам для цитирования из этих материалов. Собранный массив публикаций был проанализирован и структурирован, выделены типы задач проектирования, для решения которых может применяться визуальное программирование. На основе проанализированных источников было сделано заключение об особенностях возможностей средств визуального программирования по сравнению с альтернативными методами программирования, сделаны рекомендации по направлениям применения визуального программирования и перспективам развития данного инструмента для проектирования.

## **Основная часть**

Процесс проектирования здания или сооружения неизменно связан со множеством возникающих проблем.

Среди наиболее актуальных проблем проектирования можно выделить:

- 1) Сложность взаимодействия между архитекторами и конструкторами. Зачастую эти группы профессионалов работают в некоторой изоляции и берут на себя ответственность только за свою часть работы. Такая организация процесса проектирования поощряет формирование «бункерного менталитета», и в результате проектирование из равномерного процесса становится дискретным и уязвимым к частым конфликтам и несоответствиям между конструктивной и архитектурной частями проекта [22–24].
- 2) Несовершенство нормативно-технической базы.
- 3) Барьеры во взаимодействии между программными комплексами [25].

- 4) Ограниченные возможности программных комплексов по отдельным задачам [26].
- 5) Сложность с проработкой оптимальных проектных решений (высокие трудозатраты для вариантов проработки).

Данные проблемы приводят к необходимости вручную решать те задачи, решение которых могло бы быть автоматизировано, что повышает рутинность процессов проектирования и создает нехватку времени для поиска наиболее эффективного проектного решения.

Среды визуального программирования позволяют решать проблемы, связанные с ограниченными возможностями программных комплексов, устранять барьеры при взаимодействии между программными комплексами и снижать трудоемкость вариантной проработки проектных решений.

## **Среды визуального программирования**

### **Определение термина**

Визуальное программирование – процесс создания алгоритмов в интерфейсе среды с использованием нодов (визуального выражения функций или готовых блоков программного кода). Алгоритм может быть предназначен для построения геометрии, изменения свойств объектов, выполнения однотипных операций и проверок [13]. Созданный алгоритм может напрямую взаимодействовать с программами по моделированию информационной модели и ее расчету на прочность и устойчивость через надстройки. В алгоритме можно прописать последовательность действий по проектированию, тем самым автоматизировать процесс создания модели, сравнения версий модели, оптимизации решения.

Визуальное программирование имеет значительно более низкий порог входа по сравнению с традиционным текстовым программированием [27]. Нельзя не отметить, что большинство инженеров и архитекторов не обладают необходимым уровнем владения программированием, чтобы писать код с нуля, но могут составить алгоритм из готовых блоков (нодов) в среде визуального программирования [20]. Данный аспект выступает ключевым преимуществом сред визуального программирования по сравнению с API и написанием кода в отдельном программном обеспечении (ПО).

### **История применения визуального программирования для проектирования**

Визуальное программирование тесно взаимосвязано с графическим пользовательским интерфейсом (GUI), так как, по своей сути, выражает информацию через графические объекты и их взаимосвязи. В этой связи появление визуального программирования не могло состояться без развития графического пользовательского интерфейса, первым примером которого принято считать разработку Sketchpad Айвена Сазерленда в 1963 г. К ранним разработкам средств визуального программирования относятся Pygmalion (1975) и GRaIL (1968). В 1991 г. Microsoft запустили первую версию Visual Basic.

Появление возможности визуального программирования в архитектурном и конструкторском программном обеспечении относится к двухтысячным годам. Впервые Grasshopper появился как плагин для программы архитектурного моделирования Rhinoceros в 2007 г., с версии Rhino 6.0 Grasshopper является встроенным дополнением.

Появление Dynamo как приложения для Autodesk Revit относится к 2012 г. С 2020 г. Dynamo также является автоматически встроенным приложением в Revit.

## Современное положение дел

Наиболее успешно в сфере строительного проектирования применяются такие среды визуального программирования, как Dynamo и Grasshopper [18, 19]. Главное преимущество первого состоит в интеграции с программой информационного моделирования Revit Autodesk, что, учитывая широкое распространение программных продуктов Autodesk, значительно упрощает внедрение алгоритмического подхода. Grasshopper, являясь частью программы архитектурного моделирования Rhinoceros McNeel, содержит более продвинутые инструменты создания геометрии и анализа, а также имеет возможность взаимодействовать с большим количеством других программных комплексов, так как поддерживает различные форматы файлов.

Среда визуального программирования Grasshopper является полезным инструментом в ситуациях, где необходимо моделировать конструкции сложной геометрии, и позволяет обработать архитектурную модель, т.е. получить из нее конструктивную модель, которую уже можно отправить на расчет. В качестве примеров использования такого подхода можно привести уникальные сооружения – американские горки [28]. При проектировании уникальных, сложных с архитектурной и конструктивной точки зрения объектов возможности Grasshopper раскрываются максимально. Однако даже в относительно намного более распространенных объектах: различных торговых центрах, офисных зданиях, отелях есть место сложным геометрическим формам, а значит возможности для использования Grasshopper для построения архитектурных моделей, которые после преобразования в том же Grasshopper можно использовать для получения расчетных схем, и значительного упрощения процедур взаимодействия архитекторов и конструкторов [5, 29].

## Области применимости визуального программирования в проектировании

В связи с растущим трендом на использование вычислительных возможностей компьютеров при проектировании, а значит, и подходов к созданию проектов на основе этих возможностей, получили распространения методы, использующие вычислительные мощности компьютеров для автоматизации проектирования (конечноэлементный расчет строительных конструкций, генеративное проектирование). Визуальное программирование является ключевым инструментом, позволяющим реализовать эти методы.

Задачи строительного и архитектурного проектирования, которые рационально решать с помощью визуального программирования, можно разделить по основному методу, лежащему в основе подхода. Классификация представлена на рис. 1.



Рис. 1. Классификация сфер применения визуального программирования

Fig. 1. Classification of visual programming fields of application

Некоторые исследования [30] обращают внимание на частичное смешение терминов, касающихся вычислительного проектирования, в научной литературе и отсутствие четких границ применимости в связи с наличием соприкосновения и некоторого наложения понятий. Наложение этих понятий иллюстрируется следующей диаграммой (рис. 2).

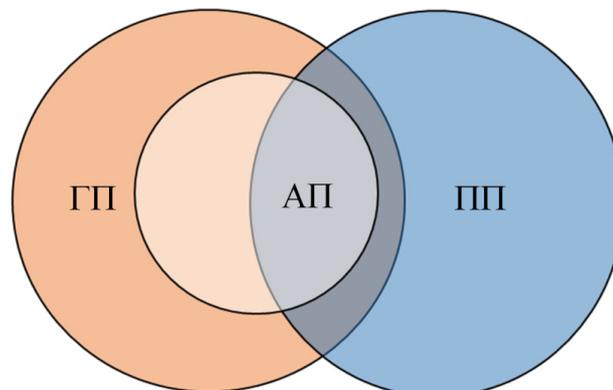


Рис. 2. Диаграмма Венна для отношения терминов согласно предложенной таксономии  
Fig. 2. Venn diagram for the relationship of terms according to the proposed taxonomy

Для удобства предлагается использовать в следующие термины:

Параметрическое проектирование (ПП) – это подход к проектированию, основанный на применении параметров для описания наборов конструкций.

Генеративное проектирование (ГП) – это подход к проектированию, при котором используются алгоритмы для создания проектов.

Алгоритмическое проектирование (АП) – это подход к генеративному проектированию, характеризующийся идентифицируемой корреляцией между алгоритмом и его результатом.

### **Параметрическое проектирование**

Параметрический подход к проектированию выражается чаще всего в использовании таких возможностей современных программных комплексов для создания моделей, которые позволяют путем изменения соответствующих параметров объекта, иначе говоря, его атрибутов, в интерактивном режиме менять геометрию объекта или его свойства. При этом к параметрическому подходу можно отнести как использование полноценных трехмерных информационных моделей, так и отдельные объекты двумерного моделирования, способные менять свою геометрию и свойства путем изменения соответствующих параметров.

Для данного подхода в первую очередь характерным является создание параметрических объектов и компонентов модели. Однако сюда можно отнести и создание сложных геометрических кривых, форм, через указание определяющих параметров [31, 32].

Несомненным плюсом этого подхода является более быстрое внесение изменений в уже существующую модель. Другим важным аспектом является наполненность модели информацией об объектах, параметрами, которые описывают модель. Высокая проработанность модели и насыщенность информацией позволяют организовывать бесшовное взаимодействие между этапами проектирования. Преимущества такого подхода по сравнению с двумерным черчением отмечались во многих работах [8, 10, 33, 34].

Стоит отметить, что среды визуального программирования (Grasshopper, Dynamo) позволяют извлекать информацию из параметров объектов модели, анализировать ее, структурировать, преобразовывать и таким образом открывают широкие возможности для автоматизации процессов проектирования, особенно находящихся на стыке анализа и моделирования. В результате появляются возможности создания плагинов и дополнительных надстроек для используемых программных комплексов. Данные плагины могут применяться для автоматизации процессов оформления, создания модели [10, 34], передачи данных из одного программного комплекса в другой [34].

### **Генеративное проектирование**

Генеративный подход к проектированию адресует проблему создания и сравнения множества версий проекта, удовлетворяющих заданным условиям. Этот подход направлен на сокращение времени, требующегося на создание моделей, и на упрощение процесса выбора оптимального решения [7–9, 12, 20, 35].

Основой генеративного подхода является алгоритм, который при заданных условиях и ограничениях генерирует несколько версий проекта. К генеративному подходу относятся такие методы, как эволюционное генерирование, метод агентных систем, симуляция физических процессов [9].

Генеративный подход широко распространен в архитектурном проектировании, где он позволяет найти новые варианты формы объекта, в том числе не всегда очевидные.

Следующей ступенью в развитии генеративного подхода является интеграция архитектурного и конструктивного проектирования [14]. Концепция такого метода позволяет одновременно создать архитектурную и конструктивную модель версии проекта, проанализировать их и внести изменения в исходные ограничения и условия, если необходимо. Реализация этого метода требует использования программ с возможностями безбарьерного обмена данными. Многие производители объединяются в таких проектах, как OpenBIM [36], чтобы обеспечить возможность обмена данными и бесшовного взаимодействия между программными комплексами. Однако проблема взаимодействия все же остается актуальной, поэтому среда визуального программирования Grasshopper может быть использована не только как платформа для создания алгоритма, но и как посредник между различными программными комплексами.

### **Алгоритмическое проектирование**

Алгоритмическое проектирование в отличие от генеративного включает в себя четко прослеживаемую связь между алгоритмом и результирующей моделью [30].

Примером реализации такого подхода может служить алгоритм в среде Grasshopper, который по заданным входным параметрам отстраивает информационную модель, тем самым выполняя задачу генерации модели, затем с помощью плагина взаимодействия с расчетной программой дополняет модель информацией, необходимой для расчета конструкции (также по заданным параметрам), и затем передает модель в программу по расчету конструкций через ссылку прямого взаимодействия для анализа [15]. При этом возможно организовать обратное взаимодействие алгоритма в среде Grasshopper и результатов расчета конструкции. Автоматизация процесса генерации модели и анализа различных вариантов проекта открывает возможности поиска действительно оптимального решения.

К алгоритмическому подходу можно отнести различные методы, использующие симуляцию физических воздействий на конструкцию, для нахождения ее оптимальной геометрической формы (form-finding), например парадигму Гауди [11].

Программные решения алгоритмического моделирования использовались при проектировании Amager Resource Center (Дания), Лахта Центр (Россия), Morpheus Hotel (Китай) [28].

Стоит отметить, что предпринимаются попытки использования данного подхода для интеграции архитектурного и конструктивного проектирования в единый процесс [37].

### **Задачи оптимизации**

Отдельно стоит отметить возможности использования визуального программирования в задачах оптимизации. В целом задачи оптимизации можно разделить на задачи оптимизации отдельной строительной конструкции (балка, ферма) и задачи оптимизации здания или сооружения в целом, т.е. совокупности строительных конструкций в их взаимодействии.

Из множества используемых алгоритмов для оптимизации конструкций можно выделить [6]:

- алгоритмы синтеза топологии,
- генетические алгоритмы [38],
- алгоритмы гармонического поиска,
- алгоритмы роя частиц, светлячков, муравьиной колонии.

Эффективность таких алгоритмов в значительной степени зависит от количества учитываемых параметров целевой функции. Введение нескольких критериев оптимальности и множества ограничений крайне усложняет алгоритм. В этом свете для реализации этих алгоритмов крайне целесообразно использовать методы автоматизированного проектирования [26].

Наиболее эффективным инструментом для построения алгоритмов оптимизации является текстовое программирование. Однако, если используемый алгоритм не содержит большого количества критериев оптимальности и ограничений, он может быть построен и в среде визуального программирования. С ростом сложности алгоритма уменьшаются возможности среды визуального программирования для его создания и соответственно увеличивается целесообразность написания кода на текстовом языке программирования.

### **Сравнение сред визуального программирования с альтернативными инструментами создания кода**

В работе [39] были рассмотрены возможности визуального программирования как инструмента по автоматизации проектирования внутри персонального компьютера (ПК) Revit по сравнению с традиционным программированием. Авторы рассматривали два подхода: 1) написание кода на языке программирования в отдельной программе с последующей загрузкой полученного плагина в Revit и 2) создание кода во встроенной среде визуального программирования Dynamo, в том числе с возможностью написания кода в специальных нодах. В качестве результатов этой работы был сделан вывод, что эти два средства автоматизации проектирования предназначены для пользователей с разными уровнями навыка программирования, а значит, оба являются востребованными. Среда визуального программирования позволяет намного более просто создавать наглядные алгоритмы, однако имеет ограниченные возможности в силу конечного числа доступных нодов. Написание кода на языке Python или C# позволяет решить задачу практически любой сложности, од-

нако требует привлечения специалиста по программированию и не всегда может быть использовано инженером-проектировщиком или архитектором.

Интерфейсы прикладного программирования API относятся к текстовому программированию, но за счет интеграции в интерфейс ПК по моделированию могут быть более удобными для использования. Встроенные API чаще всего используются для автоматизации построения объектов в модели или проведения каких-либо операций путем написания кода напрямую в API. Однако в то же время данный интерфейс позволяет интегрировать плагины, созданные на любом языке программирования.

Стоит отметить, что такие среды визуального программирования, как Dynamo и Grasshopper, также позволяют создавать пользовательские ноды через написание кода на Python в специальном блоке.

Решение задач автоматизации с помощью кодирования является наиболее эффективным методом как с точки зрения области возможностей, так и с точки зрения нагрузки на вычислительные возможности компьютера. Данный инструмент требует достаточно глубоких знаний по прикладному программированию, изучение которых сопряжено с множеством барьеров, а значит, такой подход не может использоваться повсеместно [40].

Сравнительные возможности инструментов программирования представлены в таблице и на рис. 3. Сравнение проводилось по методу обобщения информации о возможностях инструментов из научных публикаций. Веса показателей в процентах приняты равными.

### Сравнительные возможности инструментов программирования

#### Comparative features of programming tools

Наименование показателя	Grasshopper	Dynamo	API	Написание кода в отдельной программе
Скорость создания алгоритма	0,25	0,25	0,5	1
Широта возможностей	0,75	0,75	0,75	1
Нагрузка на компьютер и программные комплексы	0,25	0,25	0,5	1
Эффективность решения задач топологической и структурной оптимизации	0,75	0,25	0,5	1
Доступность с точки зрения навыков программирования	1	0,75	0,5	0,25
Работа с базами данных	0,25	0,5	0,75	1
Параметрическое моделирование конструкций	0,75	1	1	1
Генеративное проектирование	1	0,5	0,75	1
Работа с обширными базами данных	0,25	0,25	0,5	1
Создание сложной геометрии	1	0,75	0,5	0,5
Работа с воздействиями на модель	1	0,5	0,75	0,75
Анализ энергоэффективности и затенения	0,75	0,5	0,75	1
Возможность передачи данных в другой программный комплекс	1	0,25	0,5	1
Работа со свойствами объектов	0,5	1	1	1
Эффективность на стадии концептуального проектирования	1	0,75	0,5	0,5
Эффективность работы с чертежами и свойствами объектов	0,5	1	0,75	0,5
Уровень развитости сообщества пользователей и наличия дополнительных руководств	1	0,75	0,75	0,75
Скорость обработки информации в работе в большим количеством объектов	0,75	0,5	0,75	1
Наличие встроенных инструментов анализа, создания специальной геометрии и работы с базами данных	0,75	0,5	0,5	0,25

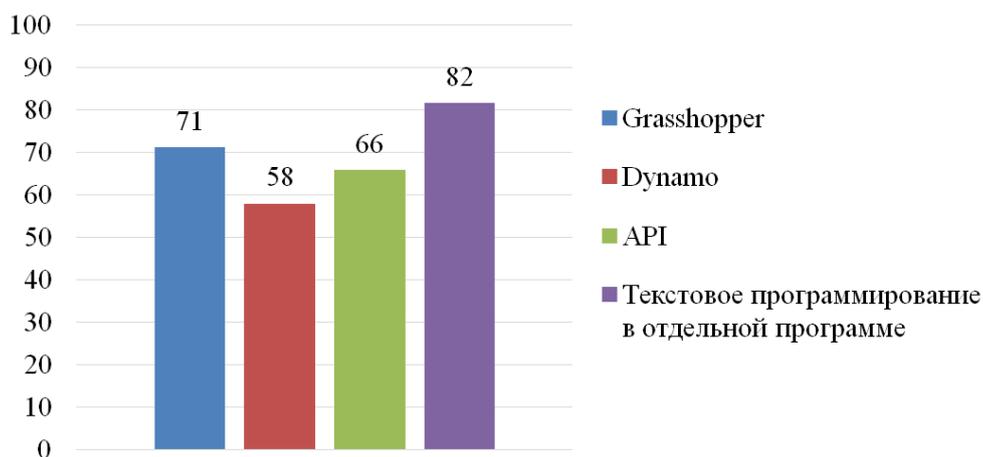


Рис. 3. Процент эффективности инструментов программирования в задачах проектирования  
Fig. 3. Percentage effectiveness of programming tools in design problems

## Обсуждение

Таким образом, по результатам сравнения инструментов визуального программирования можно сделать вывод, что Grasshopper и Dynamo являются отличными средствами для ускорения процесса проектирования и повышения качества вырабатываемых решений. Эти инструменты оказывают поддержку специалисту практически на любой стадии разработки проекта.

При этом Grasshopper в целом является более эффективным на ранних стадиях проектирования в работе с концептами, анализе и сравнении вариантов. В то же время Dynamo более эффективен на стадии документирования за счет качества работы со свойствами объектов в Revit и интеграции в эту программу.

## Выводы

Среды визуального программирования являются перспективным способом решения широкого спектра задач проектирования и намного более доступны в использовании по сравнению с написанием кода на языке программирования в специальной программе. Это обуславливает возможность их широкого применения в сфере проектирования.

Целесообразными направлениями применения визуального программирования в проектировании являются не только задачи автоматизации и параметризации процесса моделирования, но и оптимизация проектных решений, организация автоматизированного взаимодействия программных комплексов по расчету и моделированию, а также реализация различных методов поиска оптимального проектного решения, относящихся к области генеративного и алгоритмического проектирования.

Перспективным направлением для визуального программирования является создание различных плагинов для программных комплексов. Эти плагины позволяют решать конкретные задачи и дополняют функционал исходных программ. За счет относительной простоты визуального программирования создание таких плагинов под нужды конкретной компании может значительно расширить возможности наиболее используемых программных комплексов без значительных дополнительных денежных вливаний.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

## **Библиографический список**

1. Kensek K., Noble D. Building Information Modeling: BIM in current and future practice. – John Wiley & Sons, 2014. – 432 p.
2. Шеина С.Г., Петров К.С., Федоров А.А. Исследование этапов развития BIM-технологий в мировой практике и России // Строительство и техногенная безопасность. – 2019. – №14 (66). – С. 7–14.
3. Анализ зрелости BIM-решений как инструмента обеспечения жизненного цикла здания / А.С. Сунцов, О.Л. Симченко, Ю.А. Толкачев, Е.Л. Чазов, Д.Р. Самигуллина // Construction and Geotechnics. – 2020. – Т. 11, № 3. – С. 41–53. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.3.04
4. Пименов С.И. Состояние и перспективы многоуровневой системы планирования строительных проектов в условиях цифровой трансформации // Construction and Geotechnics. – 2022. – Т. 13, № 2. – С. 55–66. DOI:10.15593/2224-9826/2022.2.05
5. Тищенко Д. Система визуального программирования САПФИР-ГЕНЕРАТОР – компонент BIM-технологии // САПР и графика. – 2018. – № 4(258). – С. 12–15.
6. Тамразян А.Г., Алексейцев А.В. Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений // Вестник Московского государственного строительного университета. – 2020. – Т. 15, № 1. – С. 12–30.
7. Пархимович А.Б., Краснова А.В., Воейко О.А. Генеративный дизайн как новая ступень проектирования // Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем: сб. науч. тр. всерос. науч.-техн. конф., Курск, 30–31 мая 2019 г. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. – С. 125–129.
8. Смекалина У.М., Ерышева Е.А. Принципы генеративного проектирования в современной архитектурной практике России // Новые идеи нового века: материалы междунар. науч. конф. ФАД ТОГУ. – 2021. – Т. 1. – С. 342–346.
9. Кривенко А.А., Моор В.К., Гаврилов А.Г. Генеративное проектирование как средство формирования архитектурных объектов // Архитектура и дизайн: история, теория, инновации. – 2017. – № 2. – С. 203–206.
10. Параметрическое моделирование конструкций в среде визуального программирования / Н.А. Бузало, Н.Г. Царитова, И.Д. Платонова, В.Н. Лысенко // Вестник евразийской науки. – 2021. – Т. 13, № 4.
11. Попова Е. Е., Шегай Р. А. Реализация метода «Form-Finding» в программном комплексе Rhinoceros // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2019. – № 5(80). – С. 17–21.
12. Федчун Д. О. Сравнительный анализ методов генеративного, параметрического и информационного архитектурного проектирования // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2018. – № 2(50). – С. 103–114.
13. Семенов А. А. Обучение BIM в университете: необходимые технологии // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 15–17 мая 2019 г. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. – С. 223–227.

14. Von Buelow P. ParaGen: performative exploration of generative systems // *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*. – 2012. – Vol. 53. – P. 271.
15. Aguiar R., Cardoso C., Leitão A. Algorithmic design and analysis fusing disciplines // *Proceedings of the 37th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*, November – MIT, Cambridge, 2017. – P. 28–37.
16. ARCHICAD API: сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://archicadapi.graphisoft.com/> (дата обращения: 10.12.2022).
17. Welcome to the Revit Platform API: сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://knowledge.autodesk.com> (дата обращения: 10.12.2022).
18. Grasshopper. Grasshopper – algorithmic modeling for Rhino n.d.: сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.grasshopper3d.com/> (дата обращения: 10.12.2022).
19. B.I.M. Dynamo, Dynamo BIM, 2022: сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://dynamobim.org/> (дата обращения: 10.12.2022).
20. Leitã A., Santos L., Lopes J. Programming Languages For Generative Design: A Comparative Study // *International Journal of Architectural Computing*. – 2012. – Vol. 10. – P. 139–162. DOI: 10.1260/1478-0771.10.1.139
21. Сорочайкин А.Н. Импакт-рейтинг ряда научных журналов России по тематике «Строительство. Архитектура» на основе библиометрических показателей БД РИНЦ // *Эксперт: теория и практика*. – 2020. – № 5 (8). – С. 39–46.
22. Pärn E., Edwards D., Sing M.C.P. The building information modelling trajectory in facilities management: A review // *Automation in Construction*. – 2017. – Vol. 75. – P. 45–55. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.12.003
23. Barriers to the use of Integrated Project Delivery (IPD): A quantified model for Malaysia / S. Durdyev, M.R. Hosseini, I. Martek, S. Ismail, M. Arashpour // *Engineering Construction & Architectural Management*. – 2019. – Vol. 27, No. 1. – P. 186–204. DOI: 10.1108/ECAM-12-2018-0535
24. Enhancing collaboration in BIM-based construction networks through organisational discontinuity theory: a case study of the new Royal Adelaide Hospital / G. Mignone, M.R. Hosseini, N. Chileshe, M. Arashpour // *Architectural Engineering and Design Management*. – 2016. – Vol. 12. – P. 333–352. DOI: 10.1080/17452007.2016.1169987
25. Игнатова Е.В. Решение задач на основе информационной модели здания // *Вестник Мос. гос. строит. ун-та*. – 2012. – № 9. – С. 241–246.
26. Гинзбург А. В., Василькин А. А. Постановка задачи оптимального проектирования стальных конструкций // *Вестник Мос. гос. строит. ун-та*. – 2014. – № 6. – С. 52–62.
27. Myers B.A. Taxonomies of visual programming and program visualization // *Journal of Visual Languages and Computing*. – 1990. – Vol. 1, № 1. – P. 97–123.
28. Golenkin A. Dynamic time-history analysis of a structure subjected to moving loads with variable velocity, magnitude, and direction – Roller Coaster Design // *Structures Congress*, 24–27 April. – Orlando, Florida, 2019.
29. Лещенко Е. Параметрическое проектирование и высокотехнологичное информационное моделирование строительных конструкций на основе программного решения Tekla и Grasshopper // *САПР и графика*. – 2017. – № 8(250). – С. 31–33.
30. Caetano I., Santos L., Leitão A. Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design // *Frontiers of Architectural Research*. – 2020. – Vol. 9, № 2. – P. 287–300.

31. Стессель С.А. Заимствование природных принципов формообразования в параметрической архитектуре // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2015. – № 1(2). – С. 52–57.
32. Голованов Н.Н. Геометрическое моделирование. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2002.
33. Барабаш М. С., Киевская Е. И. Принципы параметрического моделирования строительных объектов // Современное строительство и архитектура. – 2016. – № 1(01). – С. 16–22. DOI: 10.18454/mca.2016.01.4
34. Георгиев Н. Г., Шумилов К. А., Семенов А. А. Визуальное программирование в задачах моделирования строительных конструкций // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2021. – №4 (38). – С. 117–123.
35. Santos L. Performance-based Building Design Supported by Daylight and Building Energy Simulations. Ph. D. thesis, 2020. DOI: 10.13140/RG.2.2.13983.43681
36. Концепция OpenBIM: сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://openbim.ru/openbim/> (дата обращения: 10.12.2022).
37. Hamidavi T., Abrishami S., Hosseini, M.R. Towards intelligent structural design of buildings: A BIM-based solution // Journal of Building Engineering. – 2020. – Vol. 32. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101685
38. Алексейцев А.В. Эволюционная оптимизация стальных ферм с учетом узловых соединений стержней // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 5(40). – С. 28–37. DOI: 10.5862/MCE.40. 3.
39. Divin N.V. BIM by using Revit API and Dynamo. A review // AlfaBuild. – 2020. – No 2(14). – P. 1404. DOI: 10.34910/ALF.14.4
40. Ko A., Myers B., Aun H. Six learning barriers in end-user programming systems // IEEE Symposium on Visual Languages – Human Centric Computing. – 2004. – P. 199–206. DOI: 10.1109/VLHCC.2004.47

## References

1. Kensek K., Noble D. Building Information Modeling: BIM in current and future practice. John Wiley & Sons, 2014, 432 p.
2. Sheina S.G., Petrov K.S., Fedorov A.A. Issledovaniye etapov razvitiya BIM-tekhnologiy v mirovoy praktike i Rossii [Study of the stages of development of BIM-technologies in world practice and Russia] *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'*, 2019, no. 14 (66), pp. 7-14.
3. Suntsov A.S., Simchenko O.L., Tolkachev Y.A., Chazov E.L., Samigullina D.R. Maturity analysis of BIM solutions as a tool for building life cycle support. *Construction and Geotechnics*, 2020, vol. 11, iss. 3, pp. 41-53. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.3.04.
4. Pimenov S.I. The state and prospects of a multi-level planning system for construction projects in the context of digital transformation. *Construction and Geotechnics*, 2022, vol. 13, iss. 2, pp. 55-66. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.2.05.
5. Tishchenko D. Sistema vizual'nogo programmirovaniya SAPFIR-GENERATOR - komponent BIM-tekhnologii [Visual programming system SAPPHIRE-GENERATOR - a component of BIM technology]. *SAPR i grafika*, 2018, no. 4(258), pp. 12-15.
6. Tamrazyan, A. G., Alekseytsev A.V. Sovremennyye metody optimizatsii konstruktivnykh resheniy dlya nesushchikh sistem zdaniy i sooruzheniy [Modern methods of optimization of constructive solutions for bearing systems of buildings and structures]. *Vestnik MGSU*, 2020, vol. 15, no. 1, pp. 12-30.

7. Parkhimovich A.B., Krasnova A.V., Voyeyko O.A. Generativnyy dizayn kak novaya stupen' proyektirovaniya [Generative design as a new design stage]. *Upravleniye kachestvom na etapakh zhiznennogo tsikla tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh sistem: sbornik nauchnykh trudov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, Kursk, 30–31 maya 2019 goda / Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet. Kursk, Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, 2019, pp. 125-129.

8. Smekalina U.M., Yerysheva Ye.A. Printsipy generativnogo proyektirovaniya v sovremennoy arkhitekturnoy praktike Rossii [Principles of generative design in modern architectural practice in Russia]. *Novyye idei novogo veka: materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*, FAD TOGU, 2021, vol. 1, pp. 342-346.

9. Krivenko A.A., Moor V.K., Gavrilov A.G. Generativnoye proyektirovaniye kak sredstvo formirovaniya arkhitekturnykh ob'yektov [Generative design as a means of forming architectural objects]. *Arkhitektura i dizayn: istoriya, teoriya, innovatsii*, 2017, no. 2, pp. 203-206.

10. Buzalo N.A., Tsaritova N.G., Platonova I.D., Lysenko V.N. Parametricheskoye modelirovaniye konstruksiy v srede vizual'nogo programmirovaniya [Parametric modeling of structures in the visual programming environment]. *Vestnik yevraziyskoy nauki*, 2021, vol. 13, no. 4.

11. Popova Ye.Ye., Shegay R.A. Realizatsiya metoda "Form-Finding" v programmnom komplekse Rhinoceros [Implementation of the "Form-Finding" method in the Rhinoceros software package]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy*, 2019, no. 5(80), pp. 17-21.

12. Fedchun D.O. Sravnitel'nyy analiz metodov generativnogo, parametricheskogo i informatsionnogo arkhitekturnogo proyektirovaniya [Comparative analysis of methods of generative, parametric and informational architectural design]. *Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arkhitektury*, 2018, no. 2(50), pp. 103-114.

13. Semenov A.A. Obucheniye BIM v universitete: neobkhodimyye tekhnologii [Teaching BIM at the university: necessary technologies]. *BIM-modelirovaniye v zadachakh stroitel'stva i arkhitektury: materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Sankt-Peterburg, 15–17 May 2019. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet, 2019, pp. 223-227.

14. Von Buelow P. ParaGen: performative exploration of generative systems. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 2012, vol. 53, pp. 271-278.

15. Aguiar R., Cardoso C., Leitão A. Algorithmic design and analysis fusing disciplines. *Proceedings of the 37th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*, November – MIT, Cambridge, 2017, pp. 28-37.

16. ARCHICAD API, available at: <https://archicadapi.graphisoft.com/> (accessed 10 December 2022).

17. Welcome to the Revit Platform API, available at: <https://knowledge.autodesk.com> (accessed 10 December 2022).

18. Grasshopper. Grasshopper - algorithmic modeling for Rhino n.d., available at: <https://www.grasshopper3d.com/> (accessed 10 December 2022).

19. B.I.M. Dynamo, Dynamo BIM, 2022, available at: <https://dynamobim.org/> (accessed 10 December 2022).

20. Leitão A., Santos L., Lopes J. programming languages for generative design: a comparative study. *International Journal of Architectural Computing*, 2012, vol. 10, pp. 139-162. DOI: 10.1260/1478-0771.10.1.139.

21. Sorochaykin A.N. Impakt-reyting ryada nauchnykh zhurnalov Rossii po tematike «Stroitel'stvo. Arkhitektura» na osnove bibliometricheskikh pokazateley BD RINTS [Impact rating of

a number of scientific journals in Russia on the topic “Construction. Architecture” based on bibliometric indicators of the RSCI database]. *Ekspert: teoriya i praktika*, 2020, no.5 (8), pp. 39-46.

22. Pärn E., Edwards D., Sing M. C. P. The building information modelling trajectory in facilities management: A review. *Automation in Construction*, 2017, vol. 75, pp. 45-55. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.12.003.

23. Durdyev S., Hosseini M. R., Martek I., Ismail S., Arashpour M. Barriers to the use of Integrated Project Delivery (IPD): A quantified model for Malaysia. *Engineering Construction & Architectural Management*, 2019, vol. 27, No. 1, pp. 186-204 DOI: 10.1108/ECAM-12-2018-0535.

24. Mignone G., Hosseini, M.R., Chileshe N., Arashpour M. Enhancing collaboration in BIM-based construction networks through organisational discontinuity theory: a case study of the new Royal Adelaide Hospital. *Architectural Engineering and Design Management*, 2016, vol. 12, pp. 333-352. DOI: 10.1080/17452007.2016.1169987.

25. Ignatova Ye.V. Resheniye zadach na osnove informatsionnoy modeli zdaniya [Problem solving based on the building information model]. *Vestnik MGSU*, 2012, no. 9, pp. 241-246.

26. Ginzburg A. V., Vasilkin A. A. Postanovka zadachi optimal'nogo proyektirovaniya stal'nykh konstruksiy [Statement of the problem of optimal design of steel structures]. *Vestnik MGSU*, 2014, no. 6, pp. 52-62.

27. Myers B.A. Taxonomies of visual programming and program visualization. *Journal of Visual Languages and Computing*, 1990, vol. 1, pp. 97-123.

28. Golenkin A. Dynamic time-history analysis of a structure subjected to moving loads with variable velocity, magnitude, and direction – Roller Coaster Design. *Structures Congress*, 24-27 April. Orlando, Florida, 2019.

29. Leshchenko Ye. Parametricheskoye proyektirovaniye i vysokotekhnologichnoye informatsionnoye modelirovaniye stroitel'nykh konstruksiy na osnove programmnoy resheniya Tekla i Grasshopper. [Parametric design and high-tech information modeling of building structures based on Tekla and Grasshopper software solutions]. *SAPR i grafika*, 2017, no. 8(250), pp. 31-33.

30. Caetano I., Santos L., Leitão A. Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design. *Frontiers of Architectural Research*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 287-300, ISSN 2095-2635.

31. Stessel S.A. Zaimstvovaniye prirodnykh printsipov formoobrazovaniya v parametricheskoy arkhitekture [Borrowing natural principles of shaping in parametric architecture]. *Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 1(2), pp. 52-57.

32. Golovanov N.N. Geometricheskoye modelirovaniye [Geometric modeling]. Moscow, Izdatel'stvo Fiziko-matematicheskoy literatury, 2002, 472 p.

33. Barabash, M. S., Kiyevskaya Ye. I. Printsipy parametricheskogo modelirovaniya stroitel'nykh ob'yektov [Principles of parametric modeling of building objects]. *Sovremennoye stroitel'stvo i arkhitektura*, 2016, no. 1(01), pp. 16-22. DOI: 10.18454/mca.2016.01.4.

34. Georgiyev N. G., Shumilov K. A., Semenov A. A. Vizual'noye programmirovaniye v zadachakh modelirovaniya stroitel'nykh konstruksiy [Visual programming in the problems of modeling building structures]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya*, 2021, no. 4 (38), pp. 117-123.

35. Santos L. Performance-based building design supported by daylight and building energy simulations. Ph. D. thesis, 2020. DOI: 10.13140/RG.2.2.13983.43681.

36. Kontseptsiya OpenBIM, available at: <https://openbim.ru/openbim/> (accessed 10 December 2022).

37. Hamidavi T., Abrishami S., Hosseini M. R. Towards intelligent structural design of buildings: A BIM-based solution. *Journal of Building Engineering*, 2020, vol. 32. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101685.

38. Alekseytsev A.V. Evolyutsionnaya optimizatsiya stal'nykh ferm s uchetom uzlovykh soyedineniy sterzhney [Evolutionary optimization of steel trusses with nodal connections of rods]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*, 2013, no. 5(40), pp. 28-37. DOI 10.5862/MCE.40. 3.

39. Divin N.V. BIM by using Revit API and Dynamo. A review. *AlfaBuild*, 2020, no. 2(14), pp. 1404. DOI: 10.34910/ALF.14.4.

40. Ko A., Myers B., Aung H. Six learning barriers in end-user programming systems. *IEEE Symposium on Visual Languages - Human Centric Computing*, 2004, P. 199-206. DOI: 10.1109/VLHCC.2004.47.