

Генерация параметрических поверхностей для моделирования рельефа с псевдослучайными геометрическими характеристиками

А. В. Симонов¹, М. В. Симонов²

¹Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия

²Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В статье представлен инновационный алгоритм компьютерной генерации рельефных поверхностей, разработанный для задач цифровизации аэродинамических исследований в строительной отрасли. Разработана двухуровневая методика, основанная на применении профессионального программного обеспечения и инструментов прикладной информатики и программирования. Исследование направлено на решение актуальной проблемы многократного параметрического моделирования сложных ландшафтов, необходимого для анализа аэродинамических параметров местности. Методика зарегистрирована как программа для ЭВМ и может применяться в различных задачах параметрического моделирования, в т.ч. отличных от обозначенной.

Ключевые слова: цифровая поддержка, компьютерное моделирование, численные расчеты, программная инженерия, программирование, архитектурно-строительная аэродинамика.

Generation of parametric surfaces for terrain modeling with pseudo-random geometric characteristics

A. V. Simonov¹, M. V. Simonov²

¹Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia

²National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. This paper presents an innovative algorithm for computer-generated terrain surfaces, developed for digitalizing aerodynamic research in the construction industry. The study introduces a two-level methodology based on professional software and applied computer science tools. It addresses the pressing challenge of parametric modeling for complex landscapes required to analyze terrain aerodynamic parameters. The developed method is registered as a computer program and can be applied to various parametric modeling tasks, including those beyond the specified scope.

Keywords: digital support, computer modeling, numerical calculations, software engineering, programming, architectural and construction aerodynamics

Введение

Современный этап развития научных исследований характеризуется активным внедрением цифровых технологий во все сферы познавательной деятельности [1, 2]. Особенно ярко эта тенденция проявляется в технических науках, где компьютерное моделирование стало неотъемлемой частью исследовательского процесса [3-6]. В контексте строительной аэродинамики, находящейся на стыке фундаментальной гидрогазодинамики и прикладных строительных дисциплин, цифровые методы открывают новые возможности для изучения взаимодействия архитектурных объектов с ветровыми потоками [7-10].

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью разработки эффективных инструментов параметрического моделирования рельефных поверхностей, которые позволяют проводить масштабные численные эксперименты по оценке аэродинамических характеристик строительных объектов в различных ландшафтных условиях. Традиционные подходы к созданию таких моделей, основанные на ручном вводе данных или использовании простейших генераторов случайных чисел, не обеспечивают необходимой гибкости и достоверности результатов, в частности имеющих итерационный характер.

Постановка задачи

В докладе представлен вариант решения задачи по разработке алгоритма для многократной параметрической генерации условно-случайных рельефов, пригодных для аэродинамического анализа методами компьютерного моделирования и прикладного программирования.

Теория

В рамках проведенной работы был разработан комплексный подход, сочетающий:

- применение специализированного программного обеспечения для трехмерного моделирования;
- разработку собственного алгоритма генерации рельефных поверхностей по входным геометрическим параметрам посредством использования среды программирования;
- интеграцию с системами вычислительной гидрогазодинамики.

Основные этапы исследования включали:

- анализ существующих методов параметрического моделирования;
- разработку математического аппарата для описания условно-случайных поверхностей;
- создание программной реализации алгоритма на языке C#;
- тестирование и верификацию полученных результатов.

Реализация алгоритма

Ядром разработанной методики стал двухуровневый алгоритм генерации рельефных поверхностей.

Первый уровень представляет собой оригинальную разработку – программный модуль на языке C#, выполняющий следующие функции:

- генерация координат точек рельефа по заданным параметрам: количество точек поверхностей по осям OX и OY (x , y соответственно), шаг сетки координат ($step$, м), максимальная высота точки поверхности (max , м), максимальный высотный перепад между двумя соседними узлами сетки (max_diff , м);
- контроль геометрических характеристик создаваемой поверхности;
- экспорт данных в форматы, совместимых с используемым ПО: для данного примера используется вариант вывода координат в формате электронной таблицы *.CSV*.

Отмечается, что геометрические параметры модели, являющиеся входными данными для генерации рельефной поверхности, выбираются исходя из цели исследований в области архитектурно-строительной аэродинамики, т.е. являются аргументами функции, отображающей зависимость аэродинамических параметров среды от параметров геометрических.

Алгоритм реализован в двух вариантах в зависимости от объема исходных параметров (рис. 1): базовая версия и расширенная с дополнительными возможностями управления характеристиками поверхности.



Рисунок 1. Интерфейс разрабатываемого программного обеспечения в «базовом» (а) и «продвинутом» (б) режимах работы

Основной принцип работы программы основан на построчном заполнении массивов координат и их записи в формате электронной таблицы для последующего импорта в специализированное ПО для компьютерного моделирования.

На втором уровне осуществляется создание цифровой модели с использованием профессиональных САПР-решений и последующая ее интеграция в вычислительный комплекс *Ansys*, модуль *Fluid Flow (CFX)* для проведения аэродинамических численных экспериментов.

Autodesk Revit используется для построения рельефа на основе координат точек генерируемой топоповерхности с использованием результирующего файла, полученного программным путем (рис. 2).

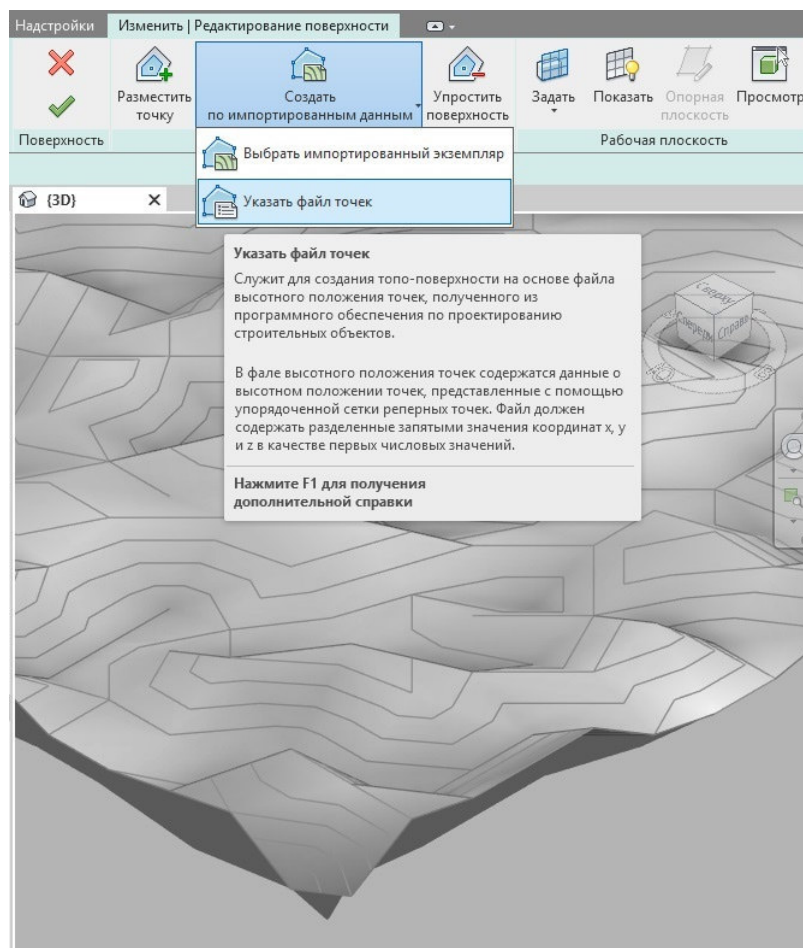


Рисунок 2. Трехмерное моделирование рельефной поверхности в программной среде

На следующем этапе производятся геометрические преобразования модели, включающие в себя экспорт поверхности в графический комплекс трехмерного моделирования для ее переформатирования в 3D-тело по последовательности, описанной на рисунке 3, а также конвертация полученной модели воздушного пространства в формат *ACIS* (.SAT), являющийся универсальным для прочтения программно-вычислительными комплексами для расчета аэродинамических параметров. При необходимости модель может быть дополнена геометрическими объектами разного рода, расположенными на поверхности топосолида.

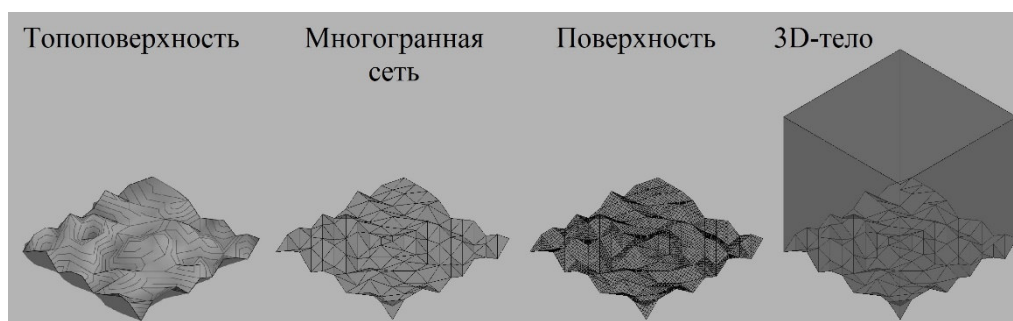


Рисунок 3. Геометрические преобразования модели в среде графического комплекса

Процессом, завершающим описываемый алгоритм, является сам аэродинамический эксперимент, включающий в себя преобразование модели в конечно-элементную посредством применения препроцессоров *DesignModeler* и *Mesh* (рис. 4), наложение на модель граничных условий в препроцессоре *Setup*, решение и визуализация расчета в постпроцессоре *Results* (рис. 5).

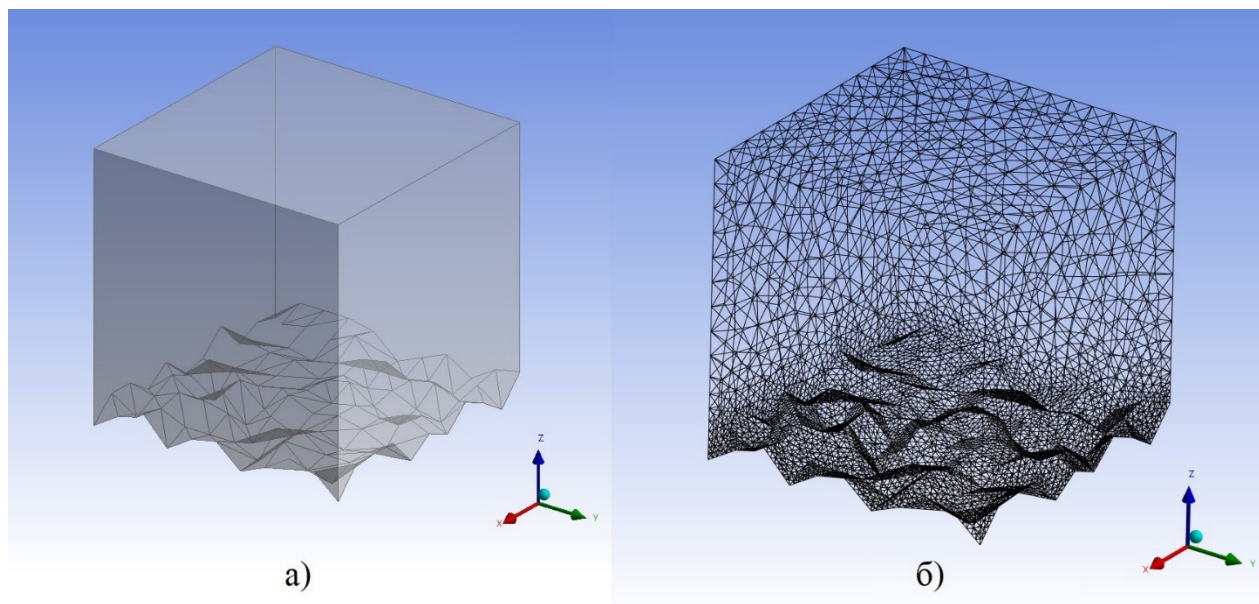


Рисунок 4. Геометрическая модель в среде препроцессора *DesignModeler* (a) и конечно-элементная расчетная модель, сформированная препроцессором *Mesh* (б)

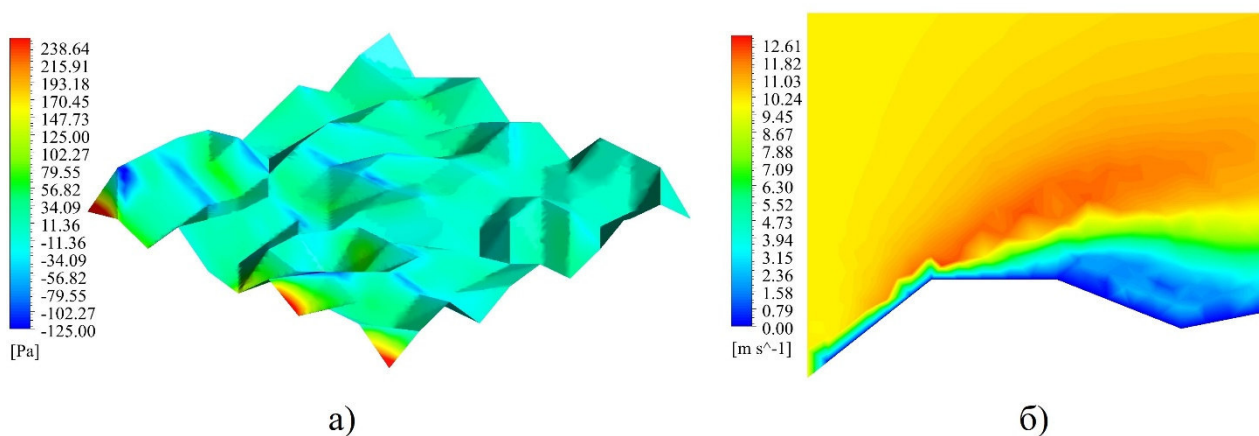


Рисунок 5. Изополя распределения давления ветровых потоков по рельефной поверхности (a) и профиль срыва ветрового потока вдоль ее излома (б) в среде постпроцессора *Results*.

Обсуждение результатов

Общий процесс генерации условно-случайной рельефной поверхности, поддерживаемый методами компьютерного моделирования и геометрических преобразований, описан в виде графологической блок-схемы на рисунке 6.

Разработанная методика была успешно апробирована в серии вычислительных экспериментов по моделированию аэродинамических процессов. Основные преимущества предложенного подхода:

- высокая степень автоматизации процесса создания моделей;
- возможность генерации большого количества вариантов рельефа для цифровой поддержки исследований, имеющих итерационный характер;
- гибкость в настройке параметров поверхности, недостижимая при ручном моделировании;
- совместимость с распространенными программными платформами, в т.ч. отечественными.

Перспективные направления дальнейшего развития включают:

- интеграцию алгоритма в *BIM*-среду через библиотеки *API*;
- разработку адаптивных методов генерации рельефа;
- создание библиотеки типовых рельефных поверхностей в зависимости от аэродинамических характеристик формируемой ими воздушной среды.

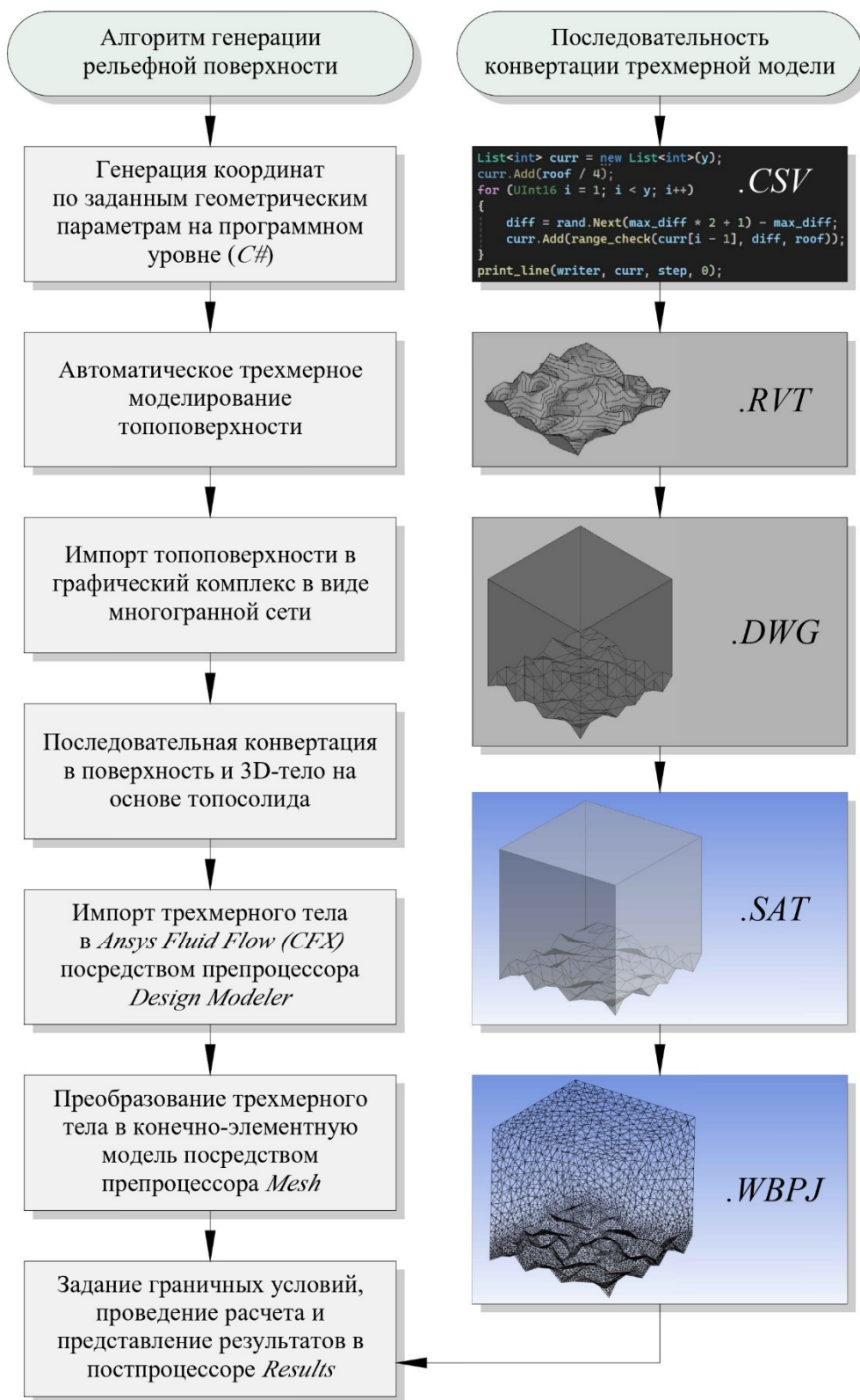


Рисунок 6. Алгоритм генерации рельефной поверхности методами компьютерного моделирования и программирования

Заключение

Представленный алгоритм компьютерной генерации рельефных поверхностей демонстрирует высокую эффективность при решении задач строительной аэродинамики. Его применение позволяет существенно сократить временные затраты на подготовку расчетных моделей и повысить достоверность результатов за счет возможности проведения многовариантных исследований.

Разработанная методика имеет значительный потенциал для использования не только в аэродинамических расчетах, но и в других областях, требующих параметрического моделирования сложных поверхностей.

В процессе разработки алгоритма цифровой поддержки аэродинамических исследований авторами было получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Генератор координат параметрических поверхностей для компьютерного моделирования рельефа» (*Номер свидетельства: RU 2025662278. Дата регистрации: 24.04.2025*).

Научный руководитель – Хазов Павел Алексеевич, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

Список литературы

1. Floridi L. The 4th Revolution: How the Infosphere is Reshaping Human Reality. Oxford: Oxford University Press, 2014. 248 p.
2. Manovich L. Cultural Analytics. Cambridge, MA: MIT Press, 2020. 320 p.
3. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Наука, 1994. 440 с. ISBN 5-02-014894-8.
4. Smith J., Doe A. Development of a C#-Based Framework for Finite Element Analysis in Mechanical Engineering // Journal of Computational Engineering. 2020. Vol. 15, no. 3. P. 45–60.
5. C#-Based Software for Automated Structural Design Optimization / R. Garcia, et al. // Engineering Structures. 2022. Vol. 45. P. 203–215.
6. Тюленев А.И., Голубкин В.А. Цифровые двойники в аэродинамических исследованиях // Ученые записки ЦАГИ. 2020. Т. 51, № 3. С. 45–58.
7. Вальгер С.А., Федоров А.В., Федорова Н.Н. Моделирование несжимаемых турбулентных течений в окрестности плохообтекаемых тел с использованием ПК ANSYS Fluent // Вычислительные технологии. 2013. Т. 18, № 5. С. 27–40.
8. Хазов П.А. Компьютерное моделирование аэродинамического обтекания комплекса уникальных зданий // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2024. Т. 21, № 6(240). С. 23–30.
9. Хазов П.А., Ведяйкина О.И. Компьютерное моделирование аэродинамического обтекания и оценка пешеходной аэродинамической комфортности комплекса зданий // Омский научный вестник. 2024. № 3(191). С. 56–63.
10. Хазов П.А., Симонов А.В., Чибаква Е.А. Влияние уровня геометрической детализации компьютерной модели на результаты анализа аэродинамических процессов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2024. Т. 21, № 11(245). С. 9–18.