

УДК 004.896

## **КЛАСИФІКАЦІЯ ОСНОВНИХ ТРИВИМІРНИХ БУДІВЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ВІМ МОДЕЛІ**

Шаповалова С.І., к.т.н.,

Кунатова О.А.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Україна)*

*При використанні в САЕ-системах ВІМ моделі необхідно, щоб всі її елементи були визначені в специфікації як стандартні будівельні конструкції. В багатьох випадках при проектуванні ВІМ моделі використовуються не тільки стандартні інструменти побудови будівельних компонентів, а й інструменти побудови геометричних примітивів, таких як: паралелепіпед, циліндр, конус та інші. Таким чином, необхідно визначити кожен компонент моделі, який представлено сукупністю геометричних примітивів, як стандартний будівельний елемент. Автоматизація приведення опису компоненту ВІМ моделі до визначення стандартного будівельного елемента є актуальною задачею.*

*В статті проведено аналіз існуючих рішень класифікації будівельних компонентів, а також базових підходів до класифікації 3D об'єктів, до яких ці конструкції відносяться. Обґрунтовано використання градієнтного бустингу, а також засобу його реалізації – бібліотеки LightGBM. Як предмет бустингу обрано дерева рішень. Результатом навчання є послідовність дерев рішень. Виділено чотири класи: стіна, колона, балка, перекриття. Виділено три ознаки для класифікації об'єктів: висота, ширина, довжина. Габаритні характеристики визначаються за орієнтованим обмежуючим прямокутником.*

*Розроблено програмну систему з двома режимами функціонування: навчання та безпосередньо розпізнавання компонентів ВІМ моделі із заповненням полів її специфікації. Відповідно кожному призначенню реалізовано окремий плагін для САД-системи Allplan.*

*Для навчання підготовлено навчальну вибірку, яка сформована на основі 10 ВІМ моделей різного призначення. В статті наведено значення параметрів навчання, з якими вдалося досягти коректного розпізнавання: кількість ітерацій бустингу, кількість ітерацій для раннього завершення, максимальна кількість замикаючих вузлів кожного дерева, метрика якості моделі.*

*Результати апробації за 50 ВІМ моделями довели ефективність*

класифікації, оскільки коректне розпізнавання становить 98,5%.

*Ключові слова:* класифікація 3D тіл, BIM модель, градієнтний бустинг, пластинчато-стрижнева модель, машинне навчання.

**Постановка проблеми.** Одним з етапів проектування будівлі є створення архітектурної моделі. Існує багато програмних засобів, які дозволяють створювати BIM модель будівлі (Building Information Model). Такі системи автоматизованого проектування будівлі пропонують архітектору набір інструментів для побудови основних конструктивних елементів будівлі (стіна, перекриття, колона, балка). Проте іноді можливості цих інструментів не дозволяють створити будівельний елемент з необхідною геометрією. У таких випадках архітектор вдається до використання інструментів 3D моделювання геометричними примітивами (паралелепіпед, циліндр, шар та інші). Проблема полягає в тому, що для подальшої роботи, наприклад побудови пластинчато-стрижневої моделі для передачі у розрахункову систему (CAE), кожен елемент моделі має бути описаний як один зі стандартних конструктивних елементів будівлі. Задачу опису кожного 3D об'єкту має розв'язувати експерт, що веде за собою додаткові витрати ресурсів висококваліфікованих спеціалістів. Тому автоматичне розпізнавання тривимірних конструктивних будівельних елементів BIM моделі є актуальним і має практичну значущість.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розв'язання задачі класифікації будівельних конструкцій запропоновано у публікаціях [1, 2]. У роботі [1] вирішено задачу класифікації об'єктів на основі алгоритму машинного навчання SVM (support-vector machines) на такі класи: підлога, стеля, дах, стіна і балка. У роботі [2] наводиться методика класифікації об'єктів вже існуючої будівлі на класи: підлога, стеля, дах, стіна, вікно та двері, виходячи з геометрії компонентів та контекстної інформації.

Конструктивні будівельні компоненти BIM моделі є тривимірними об'єктами. До базових підходів розв'язання задачі класифікації 3D об'єктів можна віднести: 1) застосування об'ємних згорткових нейронних мереж VCNN (Volumetric convolutional neural network); 2) градієнтний бустинг (gradient boosting).

VCNN – це нейронні мережі, призначені для аналізу тривимірних даних. Розпізнавання різноманітних об'єктів у реальному часі представлено у роботі [3].

Робота [4] присвячена вирішенню на основі VCNN проблеми семантичної сегментації інтер'єру приміщень, представлених у вигляді хмар точок на такі класи: стіна, стіл, стілець, людина, полиця,

об'єкт, монітор. Вихідною інформацією є помічена хмара точок, де кожній точці співставлено клас.

Згідно першому підходу, розпізнається безпосередньо 3D об'єкт. Однак для задачі класифікації будівельних компонентів доцільно використовувати класифікацію на основі градієнтного бустингу, тому, що для поточної прикладної задачі габаритні характеристики є визначальними.

Градієнтний бустинг – це алгоритм машинного навчання, призначений для вирішення задач регресії та класифікації, вперше запропонований у роботі [5]. Цей алгоритм полягає у комбінуванні (ансамблі) слабких прогнозуючих моделей (наприклад, дерев рішень) у більш сильну модель. Такі ансамблі методів застосовують у машинному навчанні для отримання більшої ефективності у вирішенні задач, ніж це можуть дати окремі моделі. Одними з основних типів ансамблів методів є беггінг (bagging) та бустинг (boosting). У градієнтному бустингу моделі будуються послідовно.

Виділяють наступні типи алгоритмів на основі ансамблів методів: градієнтний бустинг над деревами рішень [5], випадковий ліс (random forest) [6], DART (Dropouts meet Multiple Additive Regression Trees) [7], GOSS (Gradient-based One-Side Sampling) [8].

В даному дослідженні було обрано метод градієнтного бустингу над деревами рішень тому, що він відноситься до базового підходу. Інші методи пропонують оптимізації для розв'язання специфічних задач.

**Формулювання цілей статті.** Мета роботи – створити програмне забезпечення автоматичного формування специфікації (semantic labeling) тривимірних геометричних об'єктів за BIM моделлю.

**Основна частина.** На даний момент існує багато будівельних CAD-систем, які створюють BIM моделі (Allplan, Revit, ArchiCAD та інші). В цих системах проектується фізична модель будівлі.

Для розрахунків навантажень використовуються такі САЕ-системи: Dlubal, STARK ES, САПФИР. Ці системи проводять розрахунки на основі аналітичної, наприклад, пластинчато-стрижневої, моделі будівлі.

Задача полягає в тому, що на основі опису BIM необхідно створити специфікацію будівельних компонентів. Вхідною інформацією є безпосередньо BIM модель, яка представляє вигляд будівлі зовні та її приміщень. Вихідною інформацією є специфікація компонентів моделі.

Така специфікація містить інформацію про належність кожного компонента моделі будівлі певному класу будівельної конструкції. Визначено такі класи: стіна, колона, балка, перекриття.

Існує декілька основних способів визначення геометрії 3D об'єкту: полігональна сітка, граничне представлення та комбінація декількох тривимірних тіл за допомогою булевих операцій. Такими операціями є перетин, об'єднання та віднімання декількох 3D тіл.

Наприклад, візьмемо двоповерхову житлову будівлю (рис. 1).

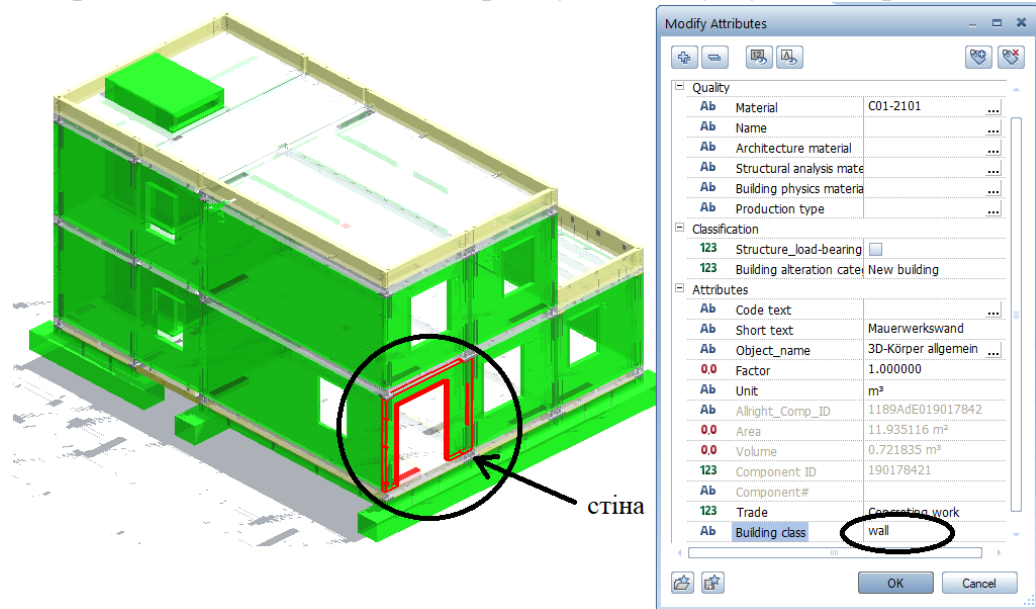


Рис. 1. Розпізнавання компоненту BIM моделі двоповерхової житлової будівлі

На відображенні у вигляді анімації BIM моделі виокремлено об'єкт, який в специфікації має бути описаний як стіна. У BIM моделі він визначається як 3D тіло, його геометрія визначена за допомогою полігональної сітки та складається з 271 грані.

В цьому прикладі задача полягає у визначенні даного 3D тіла як стіни. Це має відобразитись у відповідному атрибуті «Building class». В специфікації тривимірного тіла виокремлено відповідне поле, заповнене значенням класу стіна (wall), що відповідає результату розпізнавання.

Результатом розв'язання поточної задачі є заповнений атрибут «Building class» кожного 3D об'єкту BIM моделі відповідним значенням класу. Після заповнення, специфікація тривимірних об'єктів забезпечує повну інформацію для побудови пластинчато-стрижневої моделі будівлі.

Визначальними характеристиками тривимірних будівельних елементів є: довжина (length), ширина (width), висота (height). Додаткова проблема полягає в тому, що ці характеристики необхідно знайти у випадку, коли грані будівельного компоненту розташовані не паралельно всім координат.

Приблизним розв'язком проблеми знаходження габаритних характеристик є побудова орієнтованого обмежуючого прямокутника

(axis-aligned bounding box), приклад якого для криволінійної стіни зображено пунктирною лінією на рис. 2.

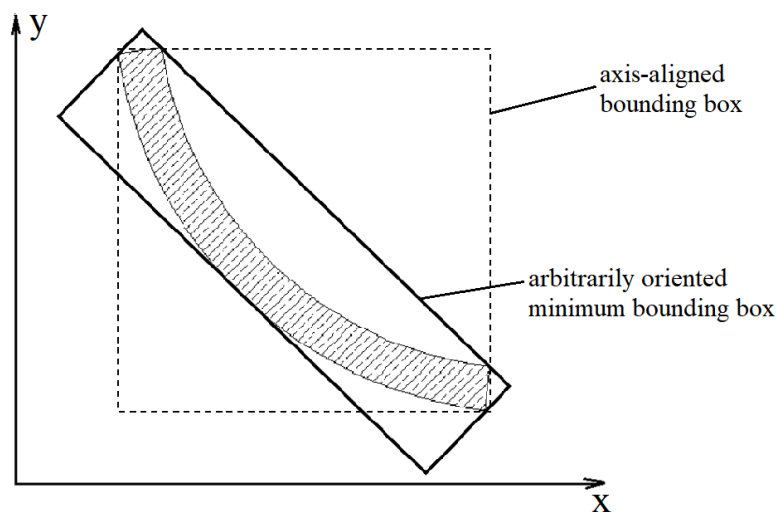


Рис. 2. Обмежуючі прямокутники криволінійної стіни (вид зверху)

Більш точним рішенням є побудова довільно орієнтованого мінімального обмежуючого прямокутника (arbitrarily oriented minimum bounding box) – жирна лінія на рис. 2. Метод побудови такого обмежуючого паралелепіпеду описано у роботі [9].

Метод градієнтного бустингу реалізовано в бібліотеках: LightGBM [10], XGBoost [11], scikit-learn [12] та інших. Найбільш ефективними є перші дві, інші мають нижчу ефективність. В даному дослідженні використовується бібліотека LightGBM.

Як предмет бустингу обрано дерева рішень. Результатом навчання є послідовність дерев рішень. Виділено чотири класи: стіна, колона, балка, перекриття. Виділено три ознаки для класифікації об'єктів: висота, ширина, довжина.

Бібліотека LightGBM дозволяє обрати одну або декілька з наступних метрик: площа під кривою помилок (Area Under Curve), функції втрат: absolute loss, square loss, logarithmic loss, Huber loss та інші.

Коректного розпізнавання вдалося досягти в результаті моделювання з такими значеннями параметрів:

- кількість ітерацій бустингу – 5000;
- кількість ітерацій для раннього завершення – 100;
- максимальна кількість замикаючих вузлів кожного дерева – 31;
- метрика якості – логістична функція помилки.

Для створення навчальної вибірки було проаналізовано 10 BIM моделей будівель різного призначення із заздалегідь визначеними класами будівельних компонентів: 6 житлових багатоповерхівок, 3 офісні будівлі, 1 торговельний центр.

Навчальна вибірка (табл. 1) формувалася з ВІМ моделей системи Allplan [13], у яких всі об'єкти будівлі були визначені специфікацією як стандартні будівельні конструкції.

Таблиця 1

Характеристики навчальної вибірки

Клас	Кількість прикладів	
	Навчальна вибірка	Тестова вибірка
Стіна	1413	353
Колона	562	140
Перекриття	182	45
Балка	517	129

Навчання було зупинено при досягненні значення логістичної функції у 0,0177651 на 362 ітерації.

Результатом навчання є модель, яка складається з 1448 дерев рішень, фрагмент одного з яких зображено на рис. 3.

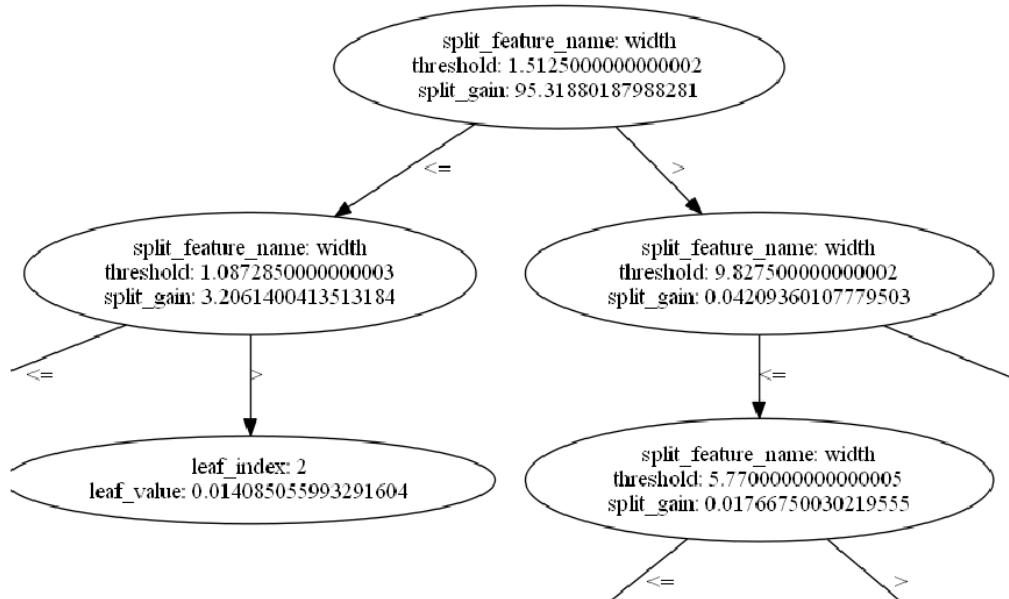


Рис. 3. Фрагмент одного з дерев рішень щодо оцінювання ширини 3D об'єкта

Програмна система має працювати у двох режимах: навчання та безпосередньо розпізнавання компонентів ВІМ моделі з визначенням її специфікації. Відповідно кожному призначенню реалізовано окремий плагін для системи Allplan.

Діаграму компонентів розробленої системи представлено на рис. 4.

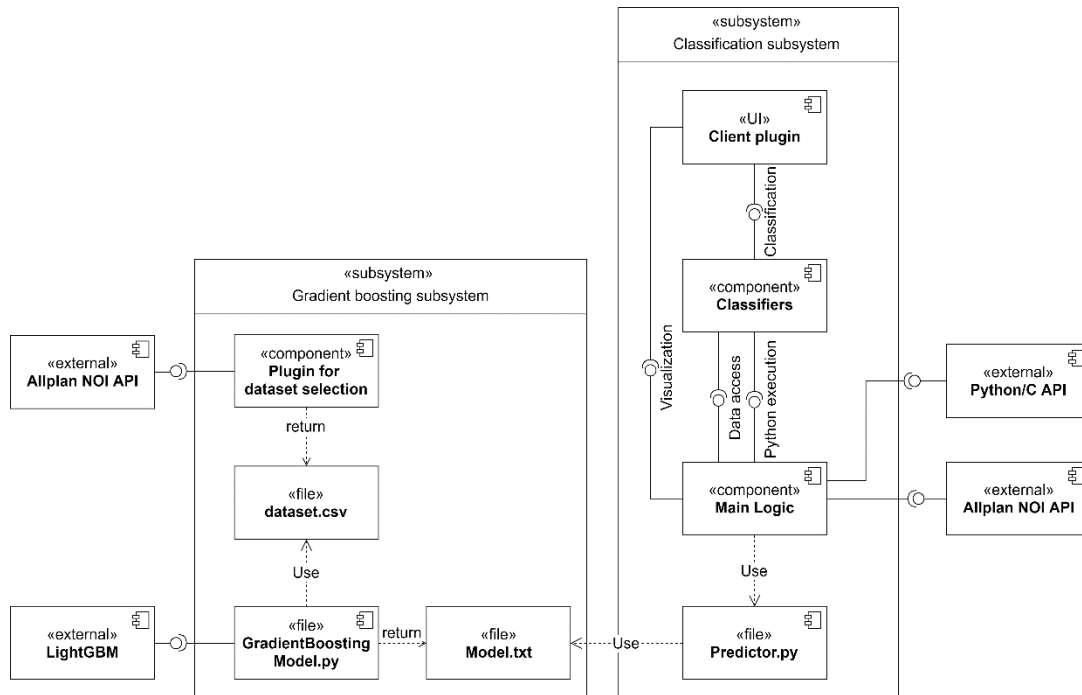


Рис. 4. Діаграма компонентів програмної системи

Перша підсистема (Gradient boosting subsystem) використовується для формування навчальних прикладів та побудови моделі на основі градієнтного бустингу. У склад цієї підсистеми входить плагін для формування файлу навчальних прикладів (Plugin for dataset selection). Цей плагін реалізовано мовою C++. За допомогою засобів Allplan NOI API він отримує всі будівельні компоненти активної в Allplan BIM моделі та формує файл-таблицю з габаритними характеристиками кожного об'єкту та його класу. Другою задачею цієї підсистеми є безпосередньо навчання. В роботі використовується алгоритм градієнтного бустингу з бібліотеки LightGBM для Python [10]. Результуюча модель записується у файл, який використовується другою підсистемою.

Друга підсистема (Classification subsystem) є оболонкою класифікатору, містить плагін для CAD-системи Allplan із графічним інтерфейсом користувача для класифікації 3D об'єктів та формування для них специфікації. Інтерфейс користувача створено за допомогою технології WPF із застосуванням MVVM патерну. Допоміжна бібліотека з головною логікою системи (Main Logic) реалізована мовою C++ з використанням Allplan NOI API для реалізації взаємодії з Allplan. Вона дозволяє отримувати 3D об'єкти поточної моделі Allplan, візуально активувати об'єкти та керувати їх видимістю. Взаємодія оболонки зі скриптами на Python (Predictor.py) реалізована за допомогою Python/C API [14]. Бібліотека Classifiers другої підсистеми надає зручний інтерфейс (Classification) для використання з боку плагіна.

Результати апробації для трьох BIM моделей зведені у таблицю 2.

Таблиця 2

## Апробація системи

№	Назва будівлі	Кількість будівельних конструкцій				Частка коректного розпізнавання, %
		Стіни	Колони	Балки	Перекриття	
1	Промислова будівля	15 100	51 96	35 97	4 100	
2	Житлова двоповерхова будівля	16 100	- -	2 100	15 100	
3	Житлова триповерхова будівля	40 98	10 100	34 97	24 96	

Всього в апробації було задіяно 50 BIM моделей, для яких визначено частку коректного розпізнавання компонентів 98,5%.

**Висновки.** На основі проведеного аналізу існуючих підходів і методів класифікації тривимірних об'єктів обґрунтовано використання градієнтного бустингу для класифікації основних тривимірних будівельних елементів BIM моделі.

Підготовлено навчальну вибірку за десятьма BIM моделями різного призначення: 6 житлових багатоповерхівок, 3 офісні будівлі, 1 торговельний центр.

Запропоновано програмне рішення автоматичного формування специфікації тривимірних геометричних об'єктів за BIM моделлю у вигляді двох плагінів для CAD-системи Allplan. Плагіни призначені відповідно: для навчання та безпосередньо формування специфікації будівельних компонентів BIM моделі.

Програмна система апробована для 50 BIM моделей. Результати випробування становлять 98,5% коректного розпізнавання.

### Література

1. Bassier M., Vergauwen M., Van Genechten B. Automated classification of heritage buildings for as-built BIM using machine learning techniques // ISPRS Annals of the PRSSIS. 2017. IV-2/W2. P. 25–30.



2. Bassier M., Vergauwen M., Van Genechten B. Automated Semantic Labelling of 3D Vector Models for Scan-to-BIM. Proceedings of the 4th Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering. 2016. P. 93–100.
3. Maturana D., Scherer S. Voxnet: A 3d convolutional neural network for real-time object recognition. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2015.
4. Babacan K., Chen L., Sohn G. (2017, 11). Semantic Segmentation of Indoor Point Clouds Using Convolutional Neural Network. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 4(4W4). 2017. P. 101–108.
5. Breinman L. Arcing the edge. University of California, Berkeley. (Technical Report 486). 1997.
6. Breiman L. Random forests. Machine learning. Volume 45(1). 2001. P. 5–32
7. Rashmi K. V., Gilad-Bachrach R. DART: Dropouts meet Multiple Additive Regression Trees. Artificial Intelligence and Statistics. 2015. P. 489–497.
8. Ke G., Meng Q., Finley T., Wang T., Chen W., Ma W., Ye Q., Liu T.Y. Lightgbm: a highly efficient gradient boosting decision tree. Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. P. 3149–3157.
9. O'Rourke J. Finding minimal enclosing boxes. *International Journal of Computer and Information Sciences*. 1985. P. 183–199
10. Microsoft/LightGBM. URL: <https://github.com/Microsoft/LightGBM>
11. XGBoosting eXtreme Gradient Boosting. URL: <https://github.com/dmlc/xgboost>
12. scikit-learn Machine Learning in Python. URL: <https://scikit-learn.org/>
13. Allplan. BIM solutions for the AEC. URL: <https://www.allplan.com/en/>
14. Python/C API Reference Manual. URL: <https://docs.python.org/3.6/c-api>.

## **КЛАССИФИКАЦИЯ ОСНОВНЫХ ТРЕХМЕРНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ BIM МОДЕЛИ**

Шаповалова С.И., Кунатова А.А.

*При использовании в САЕ-системах BIM модели необходимо, чтобы все её элементы были определены в спецификации как стандартные строительные конструкции. Во многих случаях при проектировании BIM модели используется не только стандартные инструменты построения строительных компонентов, но и инструменты построения геометрических примитивов, таких как:*

параллелепипед, цилиндр, конус и другие. Таким образом, необходимо определить каждый компонент модели, представленный совокупностью геометрических примитивов, как стандартный строительный элемент. Автоматизация приведения описания компонента BIM модели к определению стандартного строительного элемента является актуальной задачей.

В статье проведен анализ существующих решений классификации строительных компонентов, а также базовых подходов к классификации 3D объектов, к которым эти конструкции относятся. Обосновано использование градиентного бустинга, а также средства его реализации - библиотеки LightGBM. Как предмет бустинга выбраны деревья решений. Результатом обучения является последовательность деревьев решений. Выделены четыре класса: стена, колонна, балка, перекрытие. Выделены три признака для классификации объектов: высота, ширина, длина. Габаритные характеристики определяются по ориентированному ограничивающему прямоугольнику.

Разработана программная система с двумя режимами функционирования: обучение и непосредственно распознавание компонентов BIM модели с заполнением полей её спецификации. Для каждого режима функционирования реализован отдельный плагин для CAD-системы Allplan.

Для обучения подготовлено обучающую выборку, которая сформирована на основе 10 BIM моделей различного назначения. В статье приведены значения параметров обучения, с которыми удалось достичь корректного распознавания: количество итераций бустинга, количество итераций для раннего завершения, максимальное количество замыкающих узлов каждого дерева, метрика качества модели.

Результаты апробации 50 BIM моделей доказали эффективность классификации, поскольку корректное распознавание составляет 98,5%.

Ключевые слова: классификация 3D тел, BIM модель, градиентный бустинг, пластинчато-стержневая модель, машинное обучение.

## **CLASSIFICATION OF BASIC THREE-DIMENSIONAL BUILDING ELEMENTS IN BIM MODEL**

Shapovalova S., Kunatova O.

*Using the BIM models in CAE systems, it is necessary that all of its elements have been defined in the specification as standard building*

*constructions. In many cases, when designing a BIM model, not only standard construction tools for building components are used, but also tools for constructing geometric primitives, such as: a parallelepiped, a cylinder, a cone, and others. Thus, it is necessary to identify each component of the model, which is represented by a set of geometric primitives, as a standard building element. The automation of describing the component of the BIM model to the definition of a standard building element is an urgent task.*

*The article analyzes the existing solutions on the classification of construction components and basic approaches to classification of 3D objects to which these constructions are related. The use of gradient boosting and its realization (LightGBM library) is grounded. As a boosting subject selected decision trees.*

*The result of learning is the sequence of decision trees. Identified four classes: walls, columns, beams, slabs. Three features for object classification: height, width, length. Overall dimensions are determined by the axis-aligned bounding box.*

*Developed software system works in two modes of operation: training and recognition of components directly from the BIM model with filling of the fields of its specification. According to each purpose, a separate plug-in for the Allplan CAD system is implemented.*

*For training prepared dataset, which is formed based on ten BIM models for various purposes. The article presents the value of the learning parameters that have been able to achieve the correct recognition: the number of boosting iterations, the number of iterations for early stopping, the maximum number of leaves in one tree, the metric of the model.*

*The results of the testing on 50 BIM models proved the effectiveness of the classification, since the correct recognition is 98.5%.*

*Keywords: classification of 3D shapes, BIM model, gradient boosting, plate-beam model, machine learning.*