

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЛОГИСТИКА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69:004

DOI: 10.22227/2305-5502.2021.4.6

Состояние и перспективы применения систем проверки информационных моделей строительных объектов

Елена Владиславовна Макиша¹, Кирилл Алексеевич Мочкин²

¹ *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;*

² *Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ (НИЯУ МИФИ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Решение задачи автоматизированной проверки при проектировании строительных объектов происходит на международном уровне уже более 40 лет. Ранее выпускались статьи, посвященные обзору систем проверки результатов проектирования, представленных в форме информационных моделей (ИМ) строительных объектов. Однако в последние годы процесс цифровизации строительной отрасли стал более интенсивным, в него активно включились новые страны, в том числе Россия. За счет этого появились новые методологические подходы к выполнению отдельных этапов проверки, программы и системы, не описанные в более ранних обзорах. Наряду с этим, многие ранее разработанные системы модифицировались или наоборот прекратили свое существование. Цель исследования — оценка текущего состояния систем проверки ИМ строительных объектов с учетом произошедших в последние годы изменений, а также определение перспектив их дальнейшего развития.

Материалы и методы. Для определения текущего состояния систем проверки ИМ строительных объектов был выполнен подбор и анализ зарубежных и российских литературных и информационных источников в области проверки ИМ строительных объектов. За основу взяты также результаты выполненных ранее обзоров.

Результаты. Сформирован перечень действующих тиражируемых коммерческих решений в области проверки информационных моделей, классифицированный в соответствии с их назначением; систем проверки информационных моделей, разработанных в разных странах, с определением их статуса. Выявлены направления развития проверки ИМ строительных объектов международного характера и в РФ.

Выводы. На текущий момент все еще сохраняется проблема перевода нормативных требований в машиночитаемый формат для проведения проверок на соответствие им как на российском, так и на международном уровне. Поэтому основным направлением для дальнейшего развития видится исследование возможностей искусственного интеллекта для обработки нормативных требований, написанных на естественном языке. Тем не менее для применения нейронных сетей необходимо наличие данных для обучения, что говорит о необходимости предварительного получения определенного объема нормативных документов, размеченных вручную.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: информационное моделирование строительных объектов, автоматизированная проверка информационных моделей, программы проверки информационных моделей, системы проверки информационных моделей, машиночитаемые форматы нормативных документов, обработка естественного текста

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Макиша Е.В., Мочкин К.А. Состояние и перспективы применения систем проверки информационных моделей строительных объектов // Строительство: наука и образование. 2021. Т. 11. Вып. 4. Ст. 6. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.4.6

Автор, ответственный за переписку: Елена Владиславовна Макиша, MakishaEV@mgsu.ru.

The state of the testing software designated for information models of construction projects and prospects for their application

Elena V. Makisha¹, Kirill A. Mochkin²

¹ *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;*

² *National Research Nuclear University (MEPHI); Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The problem of automated testing in the process of designing construction facilities has been solved at the international level for more than 40 years. Earlier articles had overviews of design verification systems, presented in the form of information models (IM) of construction projects. However, over the last few years the process of digitalization of the construction industry has become more intense, and new countries, including Russia, have been more actively involved in it. Hence, new methodological approaches to individual stages of verification, programmes and systems, not described in

earlier reviews, have appeared. At the same time, many previously developed systems have been modified or, conversely, have ceased to exist. The purpose of this article is to evaluate the current state of IM verification systems for construction projects, taking into account the changes that have taken place over the last few years, and to determine the prospects for their further development.

Materials and methods. To determine the current state of systems for testing the IM of construction facilities, the co-authors selected and analyzed the foreign and Russian literature and information sources in the field of testing the IM of construction facilities. The results of earlier reviews were also taken as the benchmark.

Results. The co-authors made a list of currently used replicable commercial solutions for information model testing, which are classified according to their designation and a per-country list of information model testing systems, with the status identified for each system. The co-authors identified the development areas in respect of verifying international models of construction projects of international scale. Development areas in the field of verification of informational models of construction facilities at the Russian Federation level were also outlined.

Conclusions. Presently, there is still a problem of converting regulatory requirements into the machine-readable format to ensure their compliance with Russian and international standards. Therefore, the main direction for the further development is the study the potential of artificial intelligence in the processing of regulatory requirements written in a natural language. Nevertheless, the application of neural networks requires the availability of data for training, which suggests the need for a certain amount of manually marked regulatory documents in advance.

KEYWORDS: information modeling of construction projects, automated testing of information models, information model testing programmes, information model testing systems, machine-readable formats of regulatory documents, natural text processing

FOR CITATION: Makisha E.V., Mochkin K.A. The state of the testing software designated for information models of construction projects and prospects for their application. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2021; 11(4):6. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2021.4.6

Corresponding author: Elena V. Makisha, MakishaEV@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Решение задачи автоматизированной проверки при проектировании строительных объектов происходит на международном уровне уже более 40 лет. Первые разработки в этом направлении начались в 1980-х годах и представляли собой экспертные системы, чуть позднее — распределенные базы знаний [1–4]. Появившийся в 1990-х годах стандарт IFC (Industry Foundation Classes — Отраслевые базовые классы) стал унифицированным машиночитаемым описанием проектируемого строительного объекта, что дало возможность существенного развития систем автоматизированной проверки. Теперь проверяемые данные об объекте могли не только вводиться пользователем в систему, но и автоматически извлекаться из его описания в формате IFC [5–8]. В 2000-х и 2010-х гг. стали появляться различные программы для проверки информационных моделей (ИМ) в формате IFC, в некоторых странах самостоятельно или на их основе были разработаны государственные системы для выдачи разрешений на строительство по результатам проверки. Кроме того, постепенно выделилось три основных направления оценки ИМ строительных объектов, а именно проверка:

- наличия информации — анализируется присутствие заданных элементов в модели, а также наличие, заполненность и корректность значений атрибутов;
- проектных решений, где выявляются коллизии и отклонения, а также определяется соответствие нормативным документам;
- изменений, когда выполняется сравнение старой и новой версий модели, в результате которого

выявляются новые и удаленные элементы, а также сравниваются свойства измененных элементов.

Ранее выпускались статьи, посвященные обзору разработанных к тому моменту систем проверки ИМ строительных объектов [9–12]. Однако в последние годы процесс цифровизации строительной отрасли стал более интенсивным, в него активно включились новые страны, в том числе Россия. За счет этого появились новые методологические подходы к выполнению отдельных этапов проверки, программы и системы, не описанные в более ранних обзорах. Наряду с этим, многие разработанные системы модифицировались или наоборот прекратили свое существование.

Цель исследования — оценка текущего состояния систем проверки ИМ строительных объектов с учетом произошедших в последние годы изменений, а также определение перспектив их дальнейшего развития.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основной метод исследования — анализ. Для выявления текущего состояния систем проверки ИМ строительных объектов осуществлен подбор зарубежных и российских литературных и информационных источников за последние два года. За основу были взяты также результаты выполненных ранее обзоров.

Поиск соответствующей литературы и информации выполнялся следующими способами.

1. В российских и международных базах по ключевым словам, определяющим область исследования: информационное моделирование строительных объектов, автоматизированная проверка нормативных документов, building information modelling, automated

compliance checking, rule-based compliance checking, rule-checking, compliance checking, rule language, automated regulatory compliance.

2. В российских и международных базах по фамилиям и именам авторов, публиковавших научные результаты в заданной области исследования (согласно ранее выполненным обзорам), с последующей оценкой источника на соответствие теме исследования.

3. В российских и международных базах по названиям разработанных ранее систем проверки ИМ, а также на их официальных сайтах.

Анализ производился в разрезе четырех основных направлений:

- оценка текущего состояния программ проверки ИМ строительных объектов, где был сформирован широкий перечень действующих тиражируемых коммерческих решений, классифицированный в соответствии с их назначением;
- оценка текущего состояния систем проверки ИМ, разработанных на уровне разных стран, с установлением их статуса: действует, пересматривается, прекращена и т.д.;
- определение тенденций развития в области проверки ИМ строительных объектов международного характера;
- выявление ориентиров развития в области проверки ИМ строительных объектов на уровне РФ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Текущее состояние тиражируемых программ проверки информационных моделей строительных объектов

С каждым годом количество программ проверки расширяется. Некоторые идут по пути специализации на конкретном типе проверок, другие — наращивают функционал для охвата всех возможных видов оценки ИМ. В табл. 1 авторы постарались привести наиболее полный перечень действующих на текущий момент программ проверки с указанием их ключевых характеристик. В основу перечня легли результаты ранее выполненных обзоров, однако были исключены решения, прекратившие свое существование, и наоборот, включены новые программы проверки. Выполнена классификация программных продуктов по устоявшимся типам проверок.

Проведенный анализ показал, что выпущенные к настоящему моменту программы охватывают все виды проверок. Определенные сложности наблюдаются в программах по проверке на соответствие нормативным документам. К сожалению, большинство таких инструментов пока не обладают достаточно гибким функционалом для создания правил. Однако в этом отношении делаются соответствующие шаги: так, в программе Solibri в последние годы появилась возможность для пользователя создавать новые правила не только при помощи шаблонов, но и на языке программирования Java.

Табл. 1. Результаты анализа программ проверки информационных моделей строительных объектов

Название	Разработчик	Тип	Формат выходных данных	Способ добавления правил
Revit Model Checker (настройка для Autodesk Revit)	Autodesk Inc., США	Проверка на наличие и заполненность атрибутов	HTML, XLSX	Добавление пользовательских проверок через «Мастер проверок» ¹
BIM Model Checker	ООО «Академия BIM», Россия	Проверка на наличие коллизий	Навигация по модели в Autodesk Revit	Веб-интерфейс ²
Autodesk Navisworks	Autodesk Inc., США	Проверка на наличие коллизий	NWD и DWF	Добавление пользовательских проверок через «Редактор правил» [13]
Solibri	Solibri, Финляндия	<ul style="list-style-type: none"> • Проверка на наличие коллизий; • проверка на соответствие нормам; • проверка на наличие и заполненность атрибутов 	PDF, RTF и XLSX	Корректирование требований на языке программирования Java [13]

¹ Autodesk model checker for Revit. URL: <https://interoperability.autodesk.com/modelchecker.php>

² BIM Model Checker // Академия BIM. URL: <http://bimacad.ru/ru/bim-model-checker-1>

Окончание табл. 1

Название	Разработчик	Тип	Формат выходных данных	Способ добавления правил
EXPRESS Data Manager (EDM)	Jotne IT, Норвегия	<ul style="list-style-type: none"> Проверка на наличие коллизий; проверка на соответствие нормам; проверка на наличие и заполненность атрибутов 	XLSX	Написание требований на языке EXPRESS [13]
BIM Vision	Datacomp, Польша	Проверка на наличие коллизий [13]	XLS, BVF	—
AllCheck	Allbau Software, Германия	<ul style="list-style-type: none"> Проверка на наличие коллизий; проверка на соответствие нормам; проверка на наличие и заполненность атрибутов 	CSV, BCF	Настройка имеющихся правил [13]
РусБИМэксперт	РусБИМтехнологии, Россия	<ul style="list-style-type: none"> Проверка на наличие коллизий; проверка на соответствие нормам; проверка на наличие и заполненность атрибутов 	XML/BCF	Настройка имеющихся правил [13]
simpleBIM	Datacubist Oy, Финляндия	<ul style="list-style-type: none"> Проверка на наличие коллизий; проверка на наличие и заполненность атрибутов 	IFC, XLSX	Через таблицу в соответствии с шаблоном [13]
SMARTreview APR (настройка для Autodesk Revit)	SMARTreview	<ul style="list-style-type: none"> Проверка на наличие и заполненность атрибутов; проверка на соответствие нормам 	PDF	Через интерфейс путем заполнения полей ³
UpCodes AI (настройка для Autodesk Revit)	UpCodes, США	Проверка на соответствие нормам	Навигация по модели в Autodesk Revit ⁴	—

³ SMARTreview APR. URL: <https://apps.autodesk.com/RVT/ru/Detail/Index?id=1048249277506433746&appLang=en&os=Win64>

⁴ UpCodes AI. URL: <https://up.codes/features/ai>

Текущее состояние систем проверки информационных моделей, разработанных на уровне разных стран

Для выполнения задач экспертизы и выдачи решений на строительство во многих странах тиражируемые программные продукты были расширены или дополнены, применены в комплексе, или же были организованы собственные разработки систем проверки ИМ на государственном уровне. Основной задачей таких систем является проверка на соответствие нормативным документам, принятым в той или иной стране. Большинство такого рода решений построено на основе следующего алгоритма:

- перевод нормативных требований в машиночитаемый формат;

- подготовка информационной модели на предмет наличия проверяемых элементов и атрибутов;
- непосредственно проверка;
- подготовка и вывод отчета о результатах проверки [9, 14].

Рассмотрим текущее состояние систем, ранее разработанных некоторыми странами для проверки ИМ на соответствие нормативным требованиям (табл. 2).

Можно сделать вывод, что ни одна из разработанных ранее систем не действует в ее первоначальном виде, а большинство все еще находится в стадии доработки или улучшения и используется либо для отдельных проектов, либо в тестовом режиме. Это связано в первую очередь с тем, что для полноцен-

Табл. 2. Результаты анализа систем проверки информационных моделей строительных объектов

Название	Страна-разработчик	Назначение	Статус
CoreNet	Сингапур	Автоматизация процессов проверки результатов проектирования и выдачи разрешений на строительство	Пересматривается. Будет выпущена новая версия Corenet-X, позволяющая выполнять оценку единой скоординированной модели по всем дисциплинам проекта ⁵
DesignCheck	Австралия	Автоматизация проверки на соответствие требованиям стандарта AS 1428.1 «Проектирование доступа и мобильности»	Проект, в рамках которого эта система реализовывалась, закрыт ⁶
ByggSøk	Норвегия	Система электронного правительства для подачи заявок на строительство	Система закрыта. Вместо нее запущена Fellestjenester BYGG — цифровая служба для автоматического контроля заявок на строительство перед подачей в муниципалитет, объединяющая решения от нескольких программных поставщиков ⁷
Решения компании Statsbygg	Норвегия	Система, реализованная в виде веб-приложения, позволяющего создать набор требований для IFC-модели, экспортировать их в формате mvdXML, и на их основе сделать проверку наличия элемента и правильность его заполнения. Есть возможность проецирования правил на фазу проекта	Разработана единая для всех проектов система проверки на основе программы simpleBIM. Последняя версия требований SIMBA 2.0 для моделей в формате IFC 4 вступила в силу в 2021 г. ⁸
SMARTcodes	США	Методика «маркировки» электронных копий строительных норм при помощи «словаря тегов», которая легла в основу соответствующего веб-приложения	Опыт SMARTcodes был положен в основу ряда исследований, основанных на механизме тегирования RASE (Requirement, Applicability, Selection, Exception — Требование, Применимость, Выбор, Исключение) и его расширении на базе механизма правил DROOLS. Другие специалисты пытались применить к маркировке SMARTcodes язык программирования запросов LINQ, а также использовали семантическую веб-технику OWL и SWRL в комплексе с движком правил JESS. Однако, по сути, ни одно из этих начинаний не получило международного распространения [13]
SEUMTER	Корея	Автоматизация всего комплекса действий по выдаче разрешений на строительство на основе собственной методики перевода документов в машиночитаемый формат (KBIMCode)	Работы по разработке и внедрению системы включают 2021 г. ⁹
ACABIM	Новая Зеландия	Автоматизация проверок информационных моделей, в которых не требуется участие человека, на основе собственной методики перевода документов в машиночитаемый формат с использованием LegalRuleML	Действует. Ведется работа над переводом в машиночитаемый формат некоторых ключевых нормативных документов [15]

⁵ CORENET X. URL: <https://www1.bca.gov.sg/regulatory-info/building-control/corenet-x>

⁶ From the CEO's Desk. URL: <http://www.construction-innovation.info/www.construction-innovation.info/index-2.html>

⁷ Digitale løsninger for byggesøknader. URL: <https://dibk.no/tjenester-for-proffbrukere>

⁸ STATSBYGG BIM-MANUAL 2.0. URL: http://www.eubim.eu/wp-content/uploads/2019/08/2019-08-28_EU_BIM_Task_Group_Statsbygg_BIM_Manual_20_v101.pdf

⁹ Sub-task 2. URL: http://www.kbims.or.kr/en_contents02/238

ного запуска подобных систем на государственном уровне требуется перевод всего объема нормативных документов в машиночитаемый формат, что представляет собой чрезвычайно трудоемкую задачу.

Направления развития в области автоматизированной проверки информационных моделей строительных объектов на международном уровне

Перевод нормативных документов в машиночитаемый формат всегда считался одной из наиболее сложных задач при организации проверок ИМ строительных объектов. Для выполнения этой задачи использовалось два основных подхода:

- непосредственное ручное кодирование требований на языке программирования или кодирование с использованием шаблонов правил или параметрических таблиц (последнее часто применяется в коммерческих программных пакетах);
- ручная маркировка требований с использованием языков разметки и дальнейшая автоматизированная обработка для получения исполняемых правил.

Оба этих метода включают в себя большой объем ручной работы, что делает их трудоемкими и подверженными ошибкам. Неудивительно, что в последнее время многие исследователи задались вопросами автоматизации процесса формирования машиночитаемых правил.

Авторами S. Fuchs и R. Amog сделан обзор по обработке естественного языка [16]. В данной статье инструменты обработки естественного языка были рассмотрены в разрезе выполняемых ими задач:

- обработка документов: устранение переносов, удаление разрывов строк и сносок, а также разделение на разделы;
- подготовка документов: разделение предложений, токенизация, морфологический анализ и удаление стоп-слов и редких слов;
- классификация: фильтрация нерелевантных нормативных положений;
- анализ сходства текста;
- извлечение признаков: маркировка семантических ролей, таких как агенты (т.е. действующая сущность), получатели (т.е. цель действия), действия и различные модификаторы (например, наречие, местоимение, манера и время);
- извлечение информации: идентификация элементов семантической информации;
- преобразование информации в промежуточные форматы (информационные кортежи, деревья, SWRL, mvdXML, RAINS, деонтическая логика) и далее в исполняемые представления (SPARQL, XSLT, логические правила Prolog, PL/SQL);
- согласование информации: согласование информации из строительных норм и правил с информацией из ИМ строительного объекта.

Также были выявлены пробелы в исследованиях, а именно отсутствие:

- учета контекста нормативного документа;
- открытых наборов данных для обучения нейронных сетей;
- соглашений о требованиях к представлению информации;
- глубокого извлечения информации с высокой производительностью;
- точного согласования информации с высокой производительностью;
- подходов к обработке требований на основе таблиц и рисунков, а также требований к качественным характеристикам;
- подходов к обработке сложных требований;
- необходимость обеспечения качества преобразованных нормативных актов.

В работе R. Zhang и N. El-Gohary [17] предлагается метод полностью автоматизированного извлечения семантических и синтаксических элементов информации из нормативных документов на основе глубоких нейронных сетей. Применение глубоких методов машинного обучения вместо традиционных обусловлено необходимостью улавливать весь смысл текста и извлекать все имеющиеся семантические сущности, такие как субъект, атрибут, ссылка. Модели глубокого обучения обычно требуют большего объема данных для обучения. Однако в строительной области нет таких аннотированных учебных наборов данных, а их создание было бы очень дорого. Для решения этой проблемы в предлагаемом методе используется трансферное обучение, позволяющее обучать модели глубоких нейронных сетей как на общих, так и на специфических для строительства аннотированных данных.

В исследовании Wu, Chengke, X. Wang, P. Wu, J. Wang, R. Jiang, M. Chen, M. Swapan [18] предлагается гибридная модель глубокого обучения для перевода в машиночитаемый формат ограничений, возникающих при использовании методологии прогрессивного пакетирования работ AWP (Advanced Work Packaging). Ограничения в AWP представлены в виде «троек», т.е. головной сущности, отношения и хвостовой сущности. Для извлечения сущностей в этом методе используется модель двунаправленной долговременной краткосрочной памяти и условного случайного поля (BI-LSTM-CRF), что позволяет учитывать связи между словами, расположенными далеко друг от друга. Модель обучения представлению знаний (KRL) применяется для извлечения отношений между сущностями из текстовых документов.

X. Xue и J. Zhang [19] разработали новый теггер для маркировки частей речи (Part-of-Speech-теггер, POS-теггер), адаптированный для строительных норм. Он использует модель нейронной сети с глубоким обучением и правила преобразования, основанные на ошибках. Нейронная сеть содержит предварительно обученную модель и один или несколько обучаемых нейронных слоев. Предварительно обученная модель была настроена на основе строитель-

ных нормативов с тегами POS. Точная настройка предварительно обученной модели позволяет предлагаемому инструменту достичь высокой точности с небольшим объемом доступных обучающих данных. Правила преобразования, основанные на ошибках, использовались для дальнейшего повышения точности маркировки за счет исправления ошибок, допущенных моделью нейронной сети. Путем экспериментального тестирования авторы нашли хорошо работающий POS-теггер для строительных нормативов, который имел один двунаправленный обучаемый слой LSTM, использовал предварительно обученную модель BERT_Cased_Base и обучался 50 эпох.

Ранее проведенные исследования в отношении проверок ИМ строительных объектов, как правило, касались архитектурных моделей зданий. Некоторые из появившихся в последние годы работ посвящены поиску подходов по проверке иных видов строительных объектов, например железных дорог, а также проверке моделей, используемых не только для представления архитектурной части проекта, но и для других дисциплин проекта, например строительных расчетов.

В своем труде авторы работы [20] рассматривают проверку модели на основе нормативных стандартов, но в железнодорожной сфере, в которой в последнее время информационное моделирование все чаще находит свое применение.

Был выделен ряд проблем, которые могут препятствовать процессу перевода нормативной документации в машиночитаемый формат. Существующие программные решения, по мнению авторов статьи, построены либо по принципу черного ящика и имеют негибкие инструменты написания правил, либо представляют высокий порог вхождения, так как требуют от пользователя понимания языков программирования. В виде решения предлагается обратить внимание на визуальные языки программирования, которые описывают систему знаков и правил с помощью графических элементов. Так, выделяются нотации BPMN и DMN, способные за счет условных обозначений строить различные блок-схемы.

Работа затрагивает следующие вопросы:

1. Применимы ли BPMN и DMN для формализации нормативной документации в сфере железнодорожного строительства?

2. Содержит ли в себе BIM-модель железнодорожной инфраструктуры всю необходимую информацию, если она представлена в формате IFC?

В результате анализа авторы пришли к выводу, что 52 % из рассмотренных стандартов могут быть переведены в машиночитаемый формат, а 46 % из них могут быть описаны через предложенные нотации. Что касается IFC, несмотря на то, что разработка IFC4x1 все еще продолжается, версия IFC4x1 уже может использоваться для проектирования железных дорог. При этом есть возможность дополнить схему необходимыми атрибутами, для чего авторы статьи разработали интерфейс в виде веб-страницы. Также

он позволяет просматривать результаты проведенной проверки модели в виде итоговой таблицы.

Картирование правил в BPMN/DMN осуществляется вручную, но при поддержке методологии RASE, которая представляет собой полужформальный процесс анализа нормативного документа и его разметки для дальнейшей обработки.

Работа Н. Ying и S. Lee [21] связана с процессом преобразования ИМ зданий в энергетические модели BEM для дальнейшего моделирования энергопотребления. Это фундаментальная, но достаточно сложная задача, которая сводится к преобразованию трехмерной геометрии твердотельной модели в трехмерную тепловую модель поверхности, которые состоят из плоскостей и очерчивают элементы здания (стены, двери, окна, крыши и т.д.). Сложность заключается в том, что энергетическую модель нельзя смоделировать напрямую — ее можно получить путем экспорта модели в IFC. В свою очередь, алгоритмы, которые занимаются этим, не идеальны и могут привести к возникновению ошибок, авторы выделили их три типа:

- синтаксические и семантические ошибки;
- геометрические ошибки;
- ошибка согласованности (конфликт между заданным атрибутом объекта и его реальным состоянием).

Данные ошибки могут отрицательно сказаться на дальнейших расчетах, поэтому авторы ставят перед собой задачу их выявления путем верификации модели. Для этого была разработана система, состоящая из четырех модулей:

1. Интерпретация правил. Изначально они написаны на естественном языке и их необходимо преобразовать в машиночитаемый вид. Для этого был разработан алгоритм на языке C#, в который жестким кодированием было заложено порядка 38 правил.

2. Извлечение данных для проверки из IFC-файла.

3. Выполнение проверки правил, которая состоит из трех последовательных этапов в соответствии с представленным списком ошибок.

4. Отчет о результатах — модуль, который предоставляет набор заранее определенных шаблонов отчетов об ошибках.

Большинство правил предполагаемой системы было реализовано инструментом IFCDoc, а оставшаяся часть в виде прототипа приложения с пользовательским интерфейсом. Предполагаемая система была проверена на IFC-модели реального здания. Результаты показали, что система позволяет эффективно и надежно оценивать качество построения энергетической модели.

Направления развития в области автоматизированной проверки информационных моделей строительных объектов на уровне Российской Федерации

В РФ ранее уже анонсировалась работающая в тестовом режиме информационная среда общих

данных с цифровыми моделями объектов капитального строительства. Было заявлено, что данная система в будущем позволит выполнять проверки качества моделей, так и соответствия требованиям стандартов и сводов правил [13]. Однако на текущий момент авторам не удалось в публичном доступе обнаружить описание указанной системы и методики, заложенной в ней.

За последние два года как у специалистов в сфере информационного моделирования, так и у руководителей органов экспертизы не осталось сомнений в необходимости организации проверок результатов проектирования в автоматизированном режиме. Как и в других странах, основную проблему представляет необходимость перевода в машиночитаемый формат всего объема нормативных требований.

В ходе V Международной конференции «Развитие института строительной экспертизы» заместитель директора Федерального центра нормирования и стандартизации при Минстрое России (ФАУ «ФЦС») А. Неклюдов сообщил, что проведена значительная работа по развитию нормативно-правовой базы и оптимизации требований в строительстве:

- в 2020 г. в России вступил в силу новый обязательный перечень документов, подготовленный в развитие Федерального закона № ФЗ-384 «Технический регламент зданий и сооружений», в результате чего сократилось количество обязательных требований;
- в ходе совместной работы с профильными ведомствами, включая Главгосэкспертизу России и другие надзорные органы, в перечень обязательных был включен ряд новых требований;
- по инициативе ФАУ «ФЦС» была скорректирована действующая методика разработки и утверждения сводов правил, в результате чего удалось ускорить ряд процедур.

В качестве главных из последующих инициатив ведомства в области стандартизации А. Неклюдов отметил необходимость реструктуризации требований и диверсификации входящих в них элементов для создания четкой структуры строительных правил на основе различных критериев, а также необходимость их перевода в машиночитаемый формат¹⁰.

Подводя итоги пилотного проекта по прохождению государственной экспертизы с использованием информационной модели в феврале 2020 г., директор СПб ГАУ «Центр государственной экспертизы» И. Косова отметила:

«Только при условии стандартизации возможно успешное применение технологий информационного моделирования и самой цифровой информационной модели на протяжении всех этапов жизненного цикла, в том числе и на этапе экспертизы. В связи

¹⁰ Новый этап цифровизации — перевод нормативов в машиночитаемый формат. URL: <http://anchb.ru/publication/read/11896>

с этим целесообразно проведение дополнительных пилотных проектов с использованием классификатора строительной информации, который позволит идентифицировать и стандартизировать элементы цифровой информационной модели, ускорит обмен данными между различными информационными системами, упростит перевод требований технических регламентов в машиночитаемый вид»¹¹.

Однако, несмотря на эти высказывания, подчеркивающие необходимость перевода российских нормативных документов в машиночитаемый формат, пока не прослеживается однозначность относительно способа такого перевода.

А. Шалаев, руководитель учебного центра Главгосэкспертизы России на этот счет высказался так: «Следующим шагом на пути к BIM должен стать переход на машиночитаемый XML-формат обмена документами. Этот процесс уже начался — благодаря внедрению XML-схем заключений экспертизы и сметной документации»¹².

С 18 августа 2021 г. для предоставления сметной документации на экспертизу в машиночитаемом формате были введены XML-схемы. По данным Центра цифровой трансформации Главгосэкспертизы, на начало сентября 2021 г. регионы загрузили уже 175 локальных сметных расчетов в формате XML¹³.

Таким образом, можно сделать вывод, что Россия все еще находится на начальном этапе внедрения систем проверки ИМ для проведения экспертизы. Предстоят значительные усилия как для выбора способа перевода нормативных документов в машиночитаемый формат, так и для непосредственного перевода. Стоит отметить, что применение языков разметки в данном случае является эффективным решением, однако, возможно, есть смысл сконцентрироваться на конкретных специализациях XML, предназначенных для описания правил (например, RuleML или LegalRuleML).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проанализировано текущее состояние систем проверки ИМ строительных объектов. Результатами исследования стали:

- актуализированный перечень программного обеспечения в сфере проверки ИМ строительных

¹¹ Российское ПО доказало свою конкурентоспособность в информационном моделировании в рамках пилотного проекта. URL: <https://www.faufcc.ru/about-us/news-57302/>

¹² Шалаев А. Обучение не сателлит основных процессов, но стратегический усилитель развития всей организации. URL: <https://ru-bezh.ru/intervyu/42110-aleksandr-shalaev-obuchenie-ne-satellit-osnovnyix-proცessov-no>

¹³ Загрузка сметы в формате XML (.GGE) из сметной программы на Единую цифровую платформу экспертизы. URL: <https://www.all-smety.ru/company/news/zagruzka-smety-v-formate-xml-gge-iz-smetnoy-programmy-na-edinuyutstifrovuyu-platformu-ekspertizy/>

объектов с указанием ключевых характеристик: типа реализуемых проверок, формата выходных данных, способа добавления правил;

- перечень систем проверки ИМ строительных объектов с указанием их текущего статуса;
- определены направления развития в области проверки ИМ строительных объектов международного характера;
- определены ориентиры развития в области проверки ИМ строительных объектов на уровне РФ.

На текущий момент все еще сохраняется проблема перевода нормативных требований в машиночитаемый формат для проведения проверок

на соответствие им как на российском, так и на международном уровне. Поэтому основным направлением для дальнейшего развития представляется исследование возможностей искусственного интеллекта для обработки нормативных требований, написанных на естественном языке. Применение данного инструмента позволит автоматизировать процесс перевода и существенно сократить трудо- и времязатраты на него. Тем не менее для применения нейронных сетей необходимо наличие данных для обучения, что говорит о необходимости предварительного получения определенного объема нормативных документов, размеченных вручную.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Fenves S.J., Wright R.N., Stahl F.I., Reed K.A.* Introduction to SASE: Standards Analysis, Synthesis, and Expression // Report NBSIR 87-3513, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards. 1987. 196 p.
2. *Fenves S.J., Garrett J.H., Kiliccote H., Law K.H., Reed K.A.* Computer representations of design standards and building codes: U.S. perspective // *International Journal of Construction Information Technology*. 1995. Vol. 3. Issue 1. Pp. 13–34.
3. *Kerrigan S., Law K.* Logic-based regulation compliance-assistance // *Proceedings of the 9th international conference on Artificial intelligence and law*. Edinburgh, Scotland, UK, June 24–28. 2003. Pp. 126–135. DOI: 10.1145/1047788.1047820
4. *Lau G., Kerrigan S., Law K.* An Information Infrastructure for Government Regulations // *Proceedings of the 13th Workshop on Information Technology and Systems (WITS'03)*. Seattle, WA, 2003. Pp. 37–42.
5. *Han C., Kunz J., Law K.* Making automated building code checking a reality // *Facility Management Journal*. 1997. Pp. 22–28.
6. *Han C., Kunz J., Law K.* Client/server framework for on-line building code checking // *Journal of Computing in Civil Engineering*. 1998. Vol. 12. Issue 4. Pp. 181–194. DOI: 10.1061/(asce)0887-3801(1998)12:4(181)
7. *Han C., Kunz J., Law K.* Building design services in a distributed architecture // *Journal of Computing in Civil Engineering*. 1999. Vol. 13. Issue 1. Pp. 12–22. DOI: 10.1061/(asce)0887-3801(1999)13:1(12)
8. *Han C., Kunz J., Law K.* Compliance analysis for disabled access // *Advances in Digital Government Technology*. 2002. Pp. 149–163.
9. *Eastman C., Lee J., Jeong Y., Lee J.* Automatic rule-based checking of building designs // *Automation in Construction*. 2009. Vol. 18. Issue 8. Pp. 1011–1033. DOI: 10.1016/j.autcon.2009.07.002
10. *Нисбет Н., Серых А.* Эффективная автоматизация проверки строительных решений на соответствие строительным нормам // *Экспресс-информ*. 2010. № 11 (89). С. 30–35.
11. *Галкина Е.В.* Перспективы использования систем проверки информационных моделей в России // *Научное обозрение*. 2017. № 21. С. 159–161.
12. *Галкина Е.В.* Анализ инструментов верификации проектной документации // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2018. № 6. С. 95–97. DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-6-95-97
13. *Макиша Е.В.* Верификация информационных моделей строительных объектов на основе языка моделирования правил : дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. 162 с.
14. *Solihin W., Eastman C.* Classification of rules for automated BIM rule checking development // *Automation in Construction*. 2015. Vol. 53. Pp. 69–82. DOI: 10.1016/j.autcon.2015.03.003
15. *Amor R., Dimyadi J.* The promise of automated compliance checking // *Developments in the Built Environment*. 2021. Vol. 5. P. 100039. DOI: 10.1016/j.dibe.2020.100039
16. *Fuchs S., Amor R.* Natural language processing for building code interpretation: A systematic literature review // *38th International Conference of CIB W78*. Luxembourg, October. 2021. Pp. 294–303.
17. *Zhang R., El-Gohary N.* A deep neural network-based method for deep information extraction using transfer learning strategies to support automated compliance checking // *Automation in Construction*. 2021. Vol. 132. Issue 2. P. 103834. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103834
18. *Wu C., Wang X., Wu P., Wang J., Jiang R., Chen M. et al.* Hybrid deep learning model for automating constraint modelling in advanced working packaging // *Automation in Construction*. 2021. Vol. 127. Issue 10. P. 103733. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103733
19. *Xue X., Zhang J.* Part-of-speech tagging of building codes empowered by deep learning and transformational rules // *Advanced Engineering Informatics*. 2021. Vol. 47. P. 101235. DOI: 10.1016/j.aei.2020.101235

20. *Haüßler M., Esser S., Borrmann A.* Code compliance checking of railway designs by integrating BIM, BPMN and DMN // *Automation in Construction*. 2021. Vol. 121. P. 103427. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103427

21. *Huaquan Y., Lee S.* A rule-based system to automatically validate IFC second-level space boundaries for building energy analysis // *Automation in Construction*. 2021. Vol. 127. Issue 2. P. 103724. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103724

Поступила в редакцию 10 декабря 2021 г.

Принята в доработанном виде 17 декабря 2021 г.

Одобрена для публикации 17 декабря 2021 г.

О Б А В Т О Р А Х: **Елена Владиславовна Макиша** — кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 860246; MakishaEV@mgsu.ru;

Кирилл Алексеевич Мочкин — магистрант; **Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ (НИЯУ МИФИ)**; 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31; k.mochkin@yandex.ru.

Вклад авторов:

Макиша Е.В. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, обработка материала, проведение исследования, написание текста статьи.

Мочкин К.А. — сбор материала, обработка материала, проведение исследования, написание текста статьи.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INTRODUCTION

The problem of automated testing in the course of designing construction projects has been solved on a global scale for over 40 years. Early developments date back to the 1980s; they represented expert systems, and later they evolved into distributed knowledge databases [1–4]. The IFC (Industry Foundation Classes) standard, adopted in the 1990s, became a unified machine-readable description of a designed construction facility. The standard boosted the development of automated verification systems. At the time, verifiable facility data, could be not only entered by the user into the system, but also automatically extracted from its description in the IFC format [5–8]. In the 2000s and 2010s, various information model (IM) testing software began to appear; the software tested the data in the IFC format. In some countries, the state developed construction permit issuance systems, that operated on the basis of testing results. The systems were designed as independent software or the software developed on the basis of testing systems. In addition, three main areas of assessment of the IM of construction projects have gradually emerged, including the verification of:

- the availability of information: the presence of pre-set elements in a model is analyzed, as well as the presence, completeness and correctness of attribute values;
- design decisions, in respect of which collisions and deviations are identified and compliance with regulatory documents is determined;

- changes, in this case old and new versions of a model are compared; hence, new and deleted elements are identified and properties of the changed elements are compared.

Several earlier published articles contained overviews of testing systems for construction facilities that were available by that time [9–12]. However, in recent years, the process of digitalization of the construction industry has become more intensive, and new countries, including Russia, have actively joined it. Therefore, new methodological approaches to individual stages of testing, as well as new software and systems, not described in earlier reviews, have appeared. At the same time, many developed systems have been modified or, conversely, ceased to exist.

The purpose of the study is to assess the current state of IM verification systems designated for construction projects, taking into account the changes that have taken place in recent years, and to determine the prospects for their further development.

MATERIALS AND METHODS

Analysis is the principal method of research. A selection of foreign and Russian research and information sources, published over the last two years, was made to learn more about the current state of testing systems, designated for the information modeling of construction projects. Results of earlier reviews were also used as guidance.

In an effort to find relevant literature and information, the co-authors addressed the following sources:

1. Nation-wide and international databases using keywords defining the field of research: information modeling of construction facilities, automated testing of regulatory documents, building information modeling, automated compliance testing, rule-based compliance testing, rule-testing, compliance testing, rule language, automated regulatory compliance.

2. Nation-wide and international databases using the names of the authors who had published the research findings in a given field (according to previously completed reviews), followed by the source evaluation for compliance with the research area.

3. Russian and international databases using the names of the previously developed systems of testing research results, as well as their official websites.

The analysis was performed in the context of four main areas:

- assessment of the current status of IM testing software, developed for construction projects, where an extensive list of currently replicable commercial solutions has been made and classified according to their purpose;
- evaluation of the current state of IM testing systems developed by different countries, given that their

status is identified: active, under revision, discontinued, etc.;

- identification of development trends in the field of testing the IMs of construction projects of international scale;
- identification of development guidelines in the field of testing the IMs of construction facilities at the national level.

RESULTS OF THE STUDY

The current status of replicable software for testing information models of construction projects

Every year, the number of testing software goes up. Some software programmes specialize in a particular type of testing, while others are expanding their functionality to cover all possible types of IM evaluation. In Table 1, the co-authors attempted to make the most comprehensive list of currently used testing software, that specifies their key features. The list is based on the results of earlier reviews; however, solutions that had ceased to exist were excluded, and new testing software was included. Software products were classified according to traditional types of testing.

Table 1. The analysis of software for the testing of information models of construction projects

Title	Developer	Type	Output data format	How to add rules
Revit Model Checker (Add-on for Autodesk Revit)	Autodesk Inc., USA	Check for the presence and completeness of attributes	HTML, XLSX	Adding custom checks via the “Checks Wizard” ¹
BIM Model Checker	BIM Academy LLC, Russia	Check for collisions	Model navigation in Autodesk Revit	Web interface ²
Autodesk Navisworks	Autodesk Inc., USA	Check for collisions	NWD и DWF	Adding custom checks via the “Rule Editor” [13]
Solibri	Solibri, Finland	<ul style="list-style-type: none"> • Check for collisions; • check for compliance with standards; • check for the presence and completeness of attributes 	PDF, RTF и XLSX	Correcting requirements in the Java programming language [13]
EXPRESS Data Manager (EDM)	Jotne IT, Norway	<ul style="list-style-type: none"> • Check for collisions; • check for compliance with standards; • check for the presence and completeness of attributes 	XLSX	Formulating requirements in EXPRESS language [13]
BIM Vision	Datacomp, Poland	Check for collisions [13]	XLS, BVF	—
AllCheck	Allbau Software, Germany	<ul style="list-style-type: none"> • Check for collisions; • check for compliance with standards; • check for the presence and completeness of attributes 	CSV, BCF	Adjusting existing rules [13]

¹ Autodesk model checker for Revit. URL: <https://interoperability.autodesk.com/modelchecker.php>

² BIM Model Checker // BIM Academy. URL: <http://bimacad.ru/ru/bim-model-checker-1>

End of Table 1

Title	Developer	Type	Output data format	How to add rules
RusBIMexpert	RusBIMtechnologies, Russia	<ul style="list-style-type: none"> • Check for collisions; • check for compliance with standards; • check for the presence and completeness of attributes 	XML/BCF	Adjusting existing rules [13]
simpleBIM	Datacubist Oy, Finland	<ul style="list-style-type: none"> • Check for collisions; • check for the presence and completeness of attributes 	IFC, XLSX	Through the table according to the template [13]
SMARTreview APR (Add-on for Autodesk Revit)	SMARTreview	<ul style="list-style-type: none"> • Check for the presence and completeness of attributes; • check for compliance with standards 	PDF	Through the interface by filling the fields ³
UpCodes AI (Add-on for Autodesk Revit)	UpCodes, USA	Check for compliance with standards	Model navigation in Autodesk Revit ⁴	—

³ SMARTreview APR. URL: <https://apps.autodesk.com/RVT/ru/Detail/Index?id=1048249277506433746&appLang=en&os=Win64>

⁴ UpCodes AI. URL: <https://up.codes/features/ai>

The analysis has shown that the software released so far cover all types of verifications. Certain difficulties are identified in the software designated for testing the compliance with regulatory documents. Unfortunately, most of these tools do not yet have sufficiently flexible functionality to generate rules. However, steps are being taken in this direction: for example, Solibri, allows the user to generate new rules not only using templates, but also in the Java programming language.

The current status of information model testing systems developed in different countries

In many countries, replicated software products were expanded, supplemented, applied as a package, or, alternatively, nation-wide IM testing systems were launched to perform the expertise and issue construction permits. The main task of such systems is to check the compliance with the regulations in a particular country. The majority of these solutions are based on the following algorithm:

- translation of regulatory requirements into a machine-readable format;
- preparation of an information model in terms of the presence of verifiable elements and attributes;
- testing;
- preparation and issuance of a testing report [9, 14].

Let's consider the current state of the systems previously developed by some countries to verify the IM for compliance with regulatory requirements (Table 2).

It can be concluded that none of the previously developed systems operates in its original form, and the majority are still at the stage of refinement or im-

provement and are used either for individual projects or in the test mode. This is primarily due to the fact that the full-scale launch of such systems at the national level requires the conversion of all regulatory documents into a machine-readable format, which is an extremely time-consuming task.

Global trends in the development of automated verification of information models of construction projects

The conversion of regulatory documents into a machine-readable format has always been considered one of the most difficult tasks in the organization of the IM testing for construction projects. The two main approaches have been used to perform this task:

- direct manual coding of requirements in a programming language or coding using rule templates or parametric tables (the latter is often used in commercial software packages);
- manual labeling of requirements using markup languages and further automated processing to obtain executable rules.

Both of these methods involve a great deal of manual work, making them labour-intensive and error-prone. Not surprisingly, many researchers have recently concentrated on the automation of the process of generating machine-readable rules.

S. Fuchs and R. Amor have done a review on natural language processing [16]. In this paper, natural language processing tools have been considered in the context of the tasks they perform:

- document processing: removing hyphenation, removing line breaks and footnotes, and dividing documents into sections;

Table 2. The analysis of information model testing systems for construction objects

Title	Developer country	Destination	Status
CoreNet	Singapore	The automation of the testing of design results and issuing building permits	Being revised. A new version of Corenet-X will be released, allowing the evaluation of a single coordinated model across all project disciplines ⁵
DesignCheck	Australia	The automation of verification for compliance with the requirements of AS 1428.1 “Designing access and mobility”	The project within which this system was implemented is closed ⁶
ByggSøk	Norway	An electronic government system for submitting applications for construction	The system is closed. Instead, Fellestjenester BYGG was launched, a digital service for the automatic monitoring of building applications before submission to municipal authorities, that represents a combination of solutions from several software providers ⁷
Company Solutions Statsbygg	Norway	The system is implemented as a web application that allows to generate a set of requirements for an IFC model, export them in the mvdXML format, and use them to check the presence of an element and the correctness of its filling. It is possible to project rules to the project phase	A unified verification system for all projects within the framework of simpleBIM software has been developed. The latest version of SIMBA 2.0 requirements for IFC 4 models came into effect in 2021 ⁸
SMARTcodes	USA	The methodology for “tagging” electronic copies of construction regulations using the “tag dictionary”, which serves as the basis of the corresponding web application	The experience of SMARTcodes has served as the basis for a number of studies performed using the RASE tagging mechanism (Requirement, Applicability, Selection, Exception — Requirement, Applicability, Choice, Exception) and its extension based on the DROOLS rules mechanism. Other experts have tried to apply the LINQ query programming language to the SMARTcodes marking, and also used OWL and SWRL semantic web techniques in conjunction with the JESS rules engine. However, in fact, none of these endeavors gained international spread [13]
SEUMTER	Korea	The automation of the entire succession of actions for issuing construction permits based on the in-house methodology for converting documents into a machine-readable format (KBIMCode)	The work on the development and implementation of the system have been performed in 2021 ⁹
ACABIM	New Zealand	Automated information model checking, that needs no human involvement, based on the in-house method of converting documents into the machine-readable format using LegalRuleML	It works. Some key regulatory documents are being converted into a machine-readable format [15]

⁵ CORENET X. URL: <https://www1.bca.gov.sg/regulatory-info/building-control/corenet-x>⁶ From the CEO's Desk. URL: <http://www.construction-innovation.info/www.construction-innovation.info/index-2.html>⁷ Digitale løsninger for byggesøknader. URL: <https://dibk.no/tjenester-for-proffbrukere>⁸ STATSBYGG BIM-MANUAL 2.0. URL: http://www.eubim.eu/wp-content/uploads/2019/08/2019-08-28_EU_BIM_Task_Group_Statsbygg_BIM_Manual_20_v101.pdf⁹ Sub-task 2. URL: http://www.kbims.or.kr/en_contents02/238

- document preparation: sentence splitting, tokenization, morphological analysis, and removal of stop words and rare words;
 - classification: filtering out irrelevant regulatory clauses;
 - text similarity analysis;
 - feature extraction: labeling semantic roles such as agents (i.e., the acting entity), recipients (i.e., the purpose of the action), actions, and various modifiers (e.g., adverb, location, manner, and time);
 - information extraction: identification of semantic information elements;
 - information conversion into intermediate formats (information tuples, trees, SWRL, mvdXML, RAINS, deontic logic) and further into executable representations (SPARQL, XSLT, Prolog logical rules, PL/SQL);
 - harmonization of information: harmonization of information from construction regulations with information from the IM of a construction facility.
- Research gaps were also identified, viz:
- account taken of the context of a regulatory document;
 - open data sets for training neural networks;
 - agreement on information presentation requirements;
 - deep information extraction with high performance;
 - accurate matching of information with high performance;
 - table- and figure-based requirement processing approaches and qualitative performance requirements;
 - approaches to the processing of complex requirements;
 - the need for quality assurance of transformed regulations.

R. Zhang and N. El-Gohary [17] propose a method of fully automated extraction of semantic and syntactic elements of information from regulatory documents using deep neural networks. The application of deep machine learning methods instead of traditional ones is driven by the need to capture the entire meaning of the text and extract all available semantic entities such as the subject, the attribute, and the reference. Deep learning models usually require more data to learn. However, there are no such annotated training datasets in the construction domain, and it would be very expensive to have them prepared. To solve this problem, the proposed method employs transfer learning to train deep neural network models on both general and construction-specific annotated data.

In a study by Wu, Chengke, X. Wang, P. Wu, J. Wang, R. Jiang, M. Chen, and M. Swapan [18], the co-authors proposed a hybrid deep learning model to convert constraints arising from Advanced Work Packaging (AWP) methodology, into a machine-readable format. Constraints in AWP are represented as “triples”, i.e., the top entity, the relation, and the residual entity. This method uses a model of bi-directional long-last-

ing short-term memory and a conditional random field (BI-LSTM-CRF) to extract entities, allowing connections between words that are far apart to be considered. The knowledge representation learning model (KRL) is used to extract relationships between entities from textual documents.

X. Xue and J. Zhang [19] developed a new tagger for part-of-speech tagging (Part-of-Speech-tagger, POS-tagger) adapted for construction regulations. It uses a deep learning neural network model and error-based transformation rules. The neural network contains a pre-trained model and one or more trained neural layers. The pre-trained model has been tuned based on construction regulations with POS tags. The fine-tuning of the pre-trained model allows the proposed tool to achieve high accuracy using a small amount of available training data. Error-based transformation rules were used to further improve the tagging accuracy by correcting the errors made by the neural network model. Through experimental testing, the authors found a well-functioning POS tagger for construction regulations that had a single bi-directional trained LSTM layer, used a pre-trained BERT_Cased_Base model.

An earlier research on the IM verification of construction projects was generally focused on architectural models of buildings. Some of the works that have appeared in recent years are focused on finding approaches to the verification of other types of construction facilities, such as railroads, as well as the verification of models used not only to represent the architectural part of the project, but also applied to other project disciplines, such as the structural analysis.

The co-authors of [20] consider model validation based on regulatory standards in the railway sphere, in which y information modeling is increasingly finding its application.

The research works addressed a number of problems that could hinder the process of converting regulatory documentation into a machine-readable format. According to the co-authors of the article, currently used software solutions are either designed using the black box principle and have inflexible tools for writing rules, or have a high threshold of entry, as they require the user to understand programming languages. The solution is to pay attention to visual programming languages, which describe a system of signs and rules by means of graphic elements. Thus, BPMN and DMN notations can build various block diagrams.

The work addresses the following issues:

1. Are BPMN and DMN applicable for formalizing regulatory documentation on railway construction?
2. Does the BIM model of railway infrastructure contain all the necessary information if presented in the IFC format?

As a result of the analysis, the co-authors concluded that 52 % of the reviewed standards can be converted into a machine-readable format, and 46 % can be described through the proposed notations. As for IFC,

although IfcRail is still under development, the IFC4x1 version can already be used for railroad design. Necessary attributes can be added to the scheme, for which the co-authors have developed an interface in the form of a web page. It also allows to view the results of model testing in the form of a summary table.

Mapping rules in BPMN/DMN is done manually with support from the RASE methodology, which is a semiformal process of analyzing a regulatory document and its markup for further processing.

The work of H. Ying and S. Lee [21] deals with the process of converting building IMs into BEM energy models for further simulation of energy consumption. This is a fundamental, but complex task, which is reduced to the transformation of the three-dimensional geometry of a solid model into a three-dimensional thermal model of the surface, which consists of planes and outline building elements (walls, doors, windows, roofs, etc.). The difficulty is that the energy model cannot be modeled directly, it can be obtained by exporting the model to IFC. In turn, the algorithms that do this are not perfect and can lead to errors. The co-authors have identified three types:

- syntactic and semantic errors;
- geometric errors;
- a consistency error (a conflict between a given object attribute and its real state).

These errors can adversely affect further calculations, so the co-authors set the task of detecting them by verifying the model. For this purpose, a system consisting of four modules was developed:

1. Interpretation of rules. Initially they are written in a natural language and need to be converted into a machine-readable form. For this purpose, an algorithm was developed in C#, in which about 38 rules were hard-coded.
2. Extracting testable data from the IFC-file.
3. Performing the rules check which consists of three consecutive steps in accordance with the presented list of errors.
4. Reporting results: the module that provides a set of predefined error report templates.

Most of the rules in the proposed system were implemented using the IfcDoc tool, and the remaining rules were implemented in the form of a prototype application with a user interface. The proposed system was tested using an IFC model of a real building. The results show that the system allows for an efficient and reliable evaluation of the quality of the energy model construction.

Development directions in the field of automated verification of information models of construction facilities at the level of the Russian Federation

In the Russian Federation, the general data information environment, that has digital models of capital construction facilities, was earlier announced as operating in the test mode. It was stated that this system

would allow future checks of both the model quality and compliance with the requirements of standards and codes of rules [13]. However, at the moment the co-authors are unable to find in the public domain a description of the specified system and the methodology that is employs.

Over the past two years, both specialists in the field of information modeling and heads of expert review bodies have had no doubts about the need to check on the results of design in an automated mode. As in other countries, the main problem is the need to convert the entire set of regulatory requirements into machine-readable format.

At the 5th International Conference “Development of the institute of construction expertise”, A. Neklyudov, Deputy Director of the Federal Centre for rate setting and standardization of the Ministry of Construction of Russia (FTSA) said that much work had been done to develop the regulatory framework and optimize the requirements in construction:

- in 2020, a new mandatory list of documents came into force in Russia, prepared as a follow-up to Federal Law No. FZ-384 “Technical Regulations for Buildings and Structures”, which resulted in a reduction in the number of mandatory requirements;
- in the course of joint work performed with the relevant agencies, including Glavgosexpertiza of Russia and other supervisory bodies, a number of new requirements were added to the list of mandatory requirements;
- at the initiative of the Federal Tariff Service, the current methodology for developing and approving sets of rules was adjusted, and as a result, several procedures were accelerated.

A. Nekliudov emphasized the need to restructure the requirements and diversify their constituent elements to design a clear structure of building regulations based on various criteria, as well as the need to translate them into a machine-readable format as the main subsequent initiative of the department in the field of standardization¹⁰.

Summing up the results of a pilot project on the state expertise performed using the information model in February 2020, I. Kosova, Director of St. Petersburg State Autonomous Institution “Centre for State Expertise” said:

“Only standardization allows to use successfully employ information modeling technologies and the digital information model itself throughout all stages of the life cycle, including the examination stage. In this regard, it is advisable to conduct additional pilot projects using a construction information classifier, which will identify and standardize elements of the digital information model, accelerate data exchange between vari-

¹⁰ A new stage of digitalization — conversion of standards into machine-readable format. URL: <http://ancb.ru/publication/read/11896>

ous information systems, and simplify the conversion of requirements of technical regulations into a machine-readable form”¹¹.

However, despite these statements, emphasizing the need to convert Russian regulatory documents into a machine-readable format, there is still ambiguity about the conversion method.

A. Shalaev, Head of Glavgosexpertiza’s training centre, said: “The next step to BIM should be a transition to a machine-readable XML document exchange format. This process has already begun, thanks to the introduction of XML schemes of examination reports and the project budget documentation”¹².

Since August 18, 2021 XML schemes have been introduced to submit the project budget documentation for expert reviews in machine-readable formats. According to the Centre for Digital Transformation at Glavgosexpertiza, in early September 2021, the regions uploaded 175 local budgets in the XML format¹³.

Thus, we can conclude that Russia is still at the initial stage of introducing verification systems for expert review. The effort is still to be made both to select

the method of converting regulatory documents into a machine-readable format and to translate them directly. It is worth noting that the use of markup languages in this case is an effective solution, but perhaps it makes sense to focus on specific XML specializations designed to describe rules (e.g., RuleML or LegalRuleML).

CONCLUSION AND DISCUSSION

The co-authors analyzed the current state of IM testing systems of construction projects. The results of the study are as follows:

- an updated list of software for the testing of IM of construction facilities with an indication of key characteristics: the type of checks, the output data format, the method of adding rules;
- a list of verification systems for IM of construction facilities with an indication of their current status;
- the areas of development in the field of IM verification of construction facilities of the global scale were identified;
- development benchmarks in the field of verification of IM of construction facilities at the level of the Russian Federation were identified.

At the moment, there is still a problem of converting regulatory requirements into a machine-readable format for compliance checks both at the Russian and international level. Therefore, the main direction for further development seems to be the study of the ability of artificial intelligence to process regulatory requirements written in a natural language. The use of this tool will automate the conversion process and significantly reduce labour and time costs. Nevertheless, the application of neural networks requires the availability of data for training, which means the need to obtain a certain amount of regulatory documents marked manually in advance.

REFERENCES

1. Fenves S.J., Wright R.N., Stahl F.I., Reed K.A. Introduction to SASE: Standards analysis, synthesis, and expression. *Report NBSIR 87-3513, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards*. 1987; 196.
2. Fenves S.J., Garrett J.H., Kiliccote H., Law K.H., Reed K.A. Computer representations of design standards and building codes: U.S. perspective. *International Journal of Construction Information Technology*. 1995; 3(1):13-34.
3. Kerrigan S., Law K. Logic-based regulation compliance-assistance. *Proceedings of the 9th international conference on Artificial intelligence and law*. Edinburgh, Scotland, UK, June 24–28. 2003; 126-135. DOI: 10.1145/1047788.1047820
4. Lau G., Kerrigan S., Law K. An information infrastructure for government regulations. *Proceedings of the 13th Workshop on Information Technology and Systems (WITS'03)*. Seattle, WA, 2003; 37-42.
5. Han C., Kunz J., Law K. Making automated building code checking a reality. *Facility Management Journal*. 1997; 22-28.
6. Han C., Kunz J., Law K. Client/server framework for on-line building code checking. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 1998; 12(4):181-194. DOI: 10.1061/(asce)0887-3801(1998)12:4(181)
7. Han C., Kunz J., Law K. Building design services in a distributed architecture. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 1999; 13(1):12-22. DOI: 10.1061/(asce)0887-3801(1999)13:1(12)
8. Han C., Kunz J., Law K. Compliance analysis for disabled access. *Advances in Digital Government Technology*. 2002; 149-163.

9. Eastman C., Lee J., Jeong Y., Lee J. Automatic rule-based checking of building designs. *Automation in Construction*. 2009; 18(8):1011-1033. DOI: 10.1016/j.autcon.2009.07.002
10. Nisbet N., Serykh A. Efficient code checking automation. *Express-inform*. 2010; 11(89):30-35. (rus.)
11. Galkina E.V. Prospects for the use of information model verification systems in Russia. *Scientific Review*. 2017; 21:159-161. (rus.)
12. Galkina E.V. Analysis of verification tools for design documentation. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2018; 6:95-97. DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-6-95-97 (rus.)
13. Makisha E.V. *Verification of information models of building objects based on the rules modeling language: dis. for the degree of candidate tech. sciences*. Moscow, 2019; 162. (rus.)
14. Solihin W., Eastman C. Classification of rules for automated BIM rule checking development. *Automation in Construction*. 2015; 53:69-82. DOI: 10.1016/j.autcon.2015.03.003
15. Amor R., Dimyadi J. The promise of automated compliance checking. *Developments in the Built Environment*. 2021; 5:100039. DOI: 10.1016/j.dibe.2020.100039
16. Fuchs S., Amor R. Natural Language Processing for Building Code Interpretation: A Systematic Literature Review. *38th International Conference of CIB W78*. Luxembourg, October. 2021; 294-303.
17. Zhang R., El-Gohary N. A deep neural network-based method for deep information extraction using transfer learning strategies to support automated compliance checking. *Automation in Construction*. 2021; 132(2):103834. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103834
18. Wu C., Wang X., Wu P., Wang J., Jiang R., Chen M. et al. Hybrid deep learning model for automating constraint modelling in advanced working packaging. *Automation in Construction*. 2021; 127(10):103733. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103733
19. Xue X., Zhang J. Part-of-speech tagging of building codes empowered by deep learning and transformational rules. *Advanced Engineering Informatics*. 2021; 47:101235. DOI: 10.1016/j.aei.2020.101235
20. Haüßler M., Esser S., Borrmann A. Code compliance checking of railway designs by integrating BIM, BPMN and DMN. *Automation in Construction*. 2021; 121:103427. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103427
21. Huaquan Y., Lee S. A rule-based system to automatically validate IFC second-level space boundaries for building energy analysis. *Automation in Construction*. 2021; 127(2):103724. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103724

Received December 10, 2021.

Adopted in revised form on December 17, 2021.

Approved for publication on December 17, 2021.

BIONOTES: **Elena V. Makisha** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 860246; k.mochkin@yandex.ru;

Kirill A. Mochkin — master's student; **National Research Nuclear University (MEPHI)**; 31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russian Federation; k.mochkin@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Makisha E.V. — scientific leadership, research concept, development of methodology, material processing, conducting research, writing the text of the article.

Mochkin K.A. — collection of material, material processing, conducting research, writing the text of the article.

All authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare that they have no conflicts of interest.