СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ. ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ И ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ.

УДК 69:004

DOI: 10.22227/2305-5502.2020.3.1

Создание сетевой модели на основе универсальной последовательности строительных работ

И.В. Каракозова^{1,2}, А.С. Павлов³

¹ Государственное автономное учреждение города Москвы

«Научно-исследовательский аналитический центр» (ГАОУ НИИЦ); г. Москва, Россия;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

³ Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций
(ВНИИАЭС); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Информационное моделирование зданий — главное направление развития автоматизированных систем проектирования и управления. Важной составной частью информационного моделирования является передача данных в системы управления строительством. Наиболее сложный вопрос — проблема создания правильной топологии графика, соответствующей технологической последовательности и опыту управления строительными работами. Рассмотрена разработка автоматизированной системы составления графика выполнения работ, которая основана на использовании универсальной последовательности, разработанной ранее.

Материалы и методы. В результате анализа процесса составления графика работ алгоритм создания топологии разделен на несколько этапов. На первом этапе выдается текстовое описание информационной модели, которая затем преобразуется в перечень элементов здания, сооружения. Перечень элементов должен быть преобразован в перечень работ, который затем дополняется работами, не отраженными в перечне элементов. Это — отдельная сложная задача, которая в настоящем исследовании не рассматривается и является направлением дальнейших исследований авторов. На следующем этапе работам перечня присваиваются коды, которые характеризуют размещение фронта работ во времени и в пространстве.

Результаты. Разработан алгоритм превращения перечня работ в связный график выполнения работ, топология которого учитывает пространственное расположение места производства работ и последовательность взаимосвязанных процессов по времени. Последовательность работ определяется по разработанному предварительно универсальному перечню. Разработан перечень требований, предъявляемых к информации, вырабатываемой BIM-моделями. Разделение алгоритма на этапы позволяет при необходимости вносить ручные корректировки в перечень работ и их свойства.

Выводы. Разработанная методика позволяет автоматизировать процессы создания календарных планов на основе перечня элементов здания и универсальной последовательности проведения работ. На любом этапе реализации могут быть интерактивно внесены изменения и дополнения в перечень работ. В дальнейшем необходимо сформировать набор параметров конструктивных элементов, которые дадут возможность автоматизировать выбор технологических процессов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: информационное моделирование зданий, элементы здания, строительные конструкции, строительно-монтажные работы, календарный план, сетевой график, топология

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Каракозова И.В., Павлов А.С. Создание сетевой модели на основе универсальной последовательности строительных работ // Строительство: наука и образование. 2020. Т. 10. Вып. 3. Ст. 1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.3.1

Creation of a network model on the basis of a universal sequence of construction works

Irina V. Karakozova^{1,2}, Alexander S. Pavlov³

¹ Moscow State Autonomous Institution Research analytical center (NIAZ); Moscow, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

³ All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation (VNIIAES); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Building information modeling is the main direction of development of automated design and control systems. An important component of information modeling is the transfer of data into construction management systems. The most complicated issue is the problem of creating the correct graph topology relevant to the process sequence and construction management experience. The development of automated progress schedule compilation system based on the use of a universal sequence developed earlier is examined.

Materials and methods. As a result of the analysis of the progress schedule compilation process, the topology creation algorithm is divided into several stages. At the first stage, a text description of the information model is given, which is then converted into a list of building or structure elements. The list of elements should be transformed into the work item list and then supplemented with work items not reflected in the list of elements. This is a separate complex task, which is not examined in this study, and is the direction of further research by the authors. At the next stage, the work items in the list are assigned codes that define the location of the scope of works in time and space.

Results. An algorithm for converting the work item list into a coherent work schedule, the topology of which takes into account the spatial location of the work area and the sequence of interrelated processes over time, has been developed. The sequence of works is determined by a preliminarily designed universal list. The list of requirements for the information produced by BIM models is developed. Splitting the algorithm into stages allows for manual correction of the work item list and the properties of work items, if necessary.

Conclusions. The developed method allows for automation of the processes of creating construction plans based on the list of building elements and universal work sequence. At any implementation stage, the work item list may be interactively changed and supplemented. In the future, it is necessary to form a set of parameters for structural elements that will allow automating the choice of technological processes.

KEYWORDS: building information modeling, building elements, building structures, building and construction works, schedule plan, project network, topology

FOR CITATION: Karakozova I.V., Pavlov A.S. Creation of a network model on the basis of a universal sequence of construction works. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2020; 10(3):1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.3.1 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Информационное моделирование зданий является главным направлением развития автоматизированных систем проектирования и управления [1]. Важная составная часть информационного моделирования — передача данных системам управления строительством на жизненном цикле строительного объекта [2, 3]. Устойчивое развитие строительных процессов, улучшение организации работ уже невозможно без совершенствования информационных технологий [4–6]. Широкое применение находят также элементы искусственного интеллекта [7, 8], генетических алгоритмов [9], других программных средств.

Как неоднократно указывалось, наибольшие проблемы интероперабельности возникают на стыках различных областей проектирования и производства, в частности, при передаче данных из архитектурно-строительных чертежей, полученных автоматизированным путем [10–12]. Ключевое звено в создании информационной технологии для строительства — автоматизированное построение графика работ, а именно сетевой модели на основе перечня работ, получаемого в результате работы систем автоматизированного проектирования [13, 14].

Сведения архитектурно-строительного чертежа можно представить в виде таблицы записей, каждая из которых представляет собой некоторый элемент строительного объекта. В такой записи могут присутствовать данные, позволяющие распознать свойства каждого элемента, заложенные проектировщиком (архитектором, конструктором,

специалистом по различным разделам проектирования) [15, 16]. В то же время не всегда эта информация достаточна для построения графика работ и создания соответствующих разделов технической документации (ПОС, ППР, производственных планов), необходимых для заключения договоров и планирования работ [17]. Поэтому методы автоматизированного построения календарных графиков рассматриваются редко и мало связаны с технологией BIM-проектирования [18, 19].

Обратим внимание, что проблемы часто возникают на заключительных этапах первой стадии проектирования, когда необходимо определиться с договорными условиями подряда, а рабочих чертежей еще нет. При этом на составление графика работ отводится небольшое время, так как оно выполняется, как правило, в конце первой стадии проектирования, сроки которой ограничены договорными и нормативными условиями. Такой график, определяющий общую продолжительность строительства, необходим как заказчику, так и подрядчику.

Сформулируем основные проблемы, возникающие на этом этапе:

- отсутствует методика (алгоритм) автоматизированного составления сетевой модели и графика производства работ на основе перечня архитектурно-строительных элементов;
- по результатам автоматизированного проектирования, как правило, невозможно понять результаты технологических процессов, не выражающиеся в физических элементах готового здания или сооружения: котлованы, траншеи, леса, технологические приспособления, временные здания и соору-

жения и т.п. Эта проблема отмечается и в зарубежных исследованиях [2];

- на чертежах первой стадии проектирования, соответствующей примерно LOD 300 [20], в ряде случаев отсутствуют детали представления строительных конструкций, необходимые для полного описания процессов производства работ. Архитектор часто не заинтересован в разработке технологических подробностей или не имеет такой возможности [15];

- сметная документация, как правило, в этот период только разрабатывается и не всегда может служить основой для составления графиков производства работ;

- в случае бюджетного финансирования стройки потенциальный подрядчик не известен государственному (муниципальному) заказчику, так как конкурс еще не проводится. Поэтому точные данные по применяемой технологии и организации работ проектировщику недоступны.

В связи с этим возникает необходимость разработки методики автоматизированного построения сетевого графика на основе BIM-технологий, применяемой, в том числе, на ранних стадиях проектирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим возможность создания методики (алгоритма) автоматизированного составления сетевой модели. В результате анализа процесса составления графика предлагается разделить алгоритм на несколько этапов трансформации, которые последовательно передают информацию на следующий этап. Впервые поэтапная схема передачи и распознавания данных в системах автоматизированного проектирования была предложена в труде [21]. В настоящее время такими этапами могут быть (рис. 1):

- выдача упорядоченных данных по архитектурно-конструктивным элементам средствами автоматизированного проектирования;

- дополнение данных технологическими процессами, не отраженными в архитектурно-строительных элементах;

- подбор данных по трудозатратам и затратам машинного времени;

- определение последовательности работ, составление топологической сетевой модели и расчет календарного графика работ.

Первый этап указанной последовательности, как правило, обеспечивается программой автоматизированного проектирования на основе информационных технологий [22]. В качестве примеров можно привести такие комплексы, как ArchiCAD, Nemetschek, Revit и др. Для выдачи информации часто используется текстовый IFC-формат¹ и COBie [23] в виде таблиц Excel.

В качестве формата промежуточной передачи данных предлагаются файлы электронной таблицы Excel, позволяющие не только считывать и записывать данные, но и просматривать, а также корректировать их специалистом. Могут быть использованы и другие форматы, в частности, текстовые файлы и форматы баз данных. При этом этапы автоматизированной обработки информации чередуются с этапами контроля данных пользователем (см. рис. 1).

Для автоматизированного выбора технологий, подбора норм, учета вспомогательных затрат и условий производства работ необходимо создавать «словари», в которых определяется соответ-

¹ ГОСТ Р 10.0.02-2019 / ИСО 16739-1:2018. Система стандартов информационного моделирования зданий и сооружений. Отраслевые базовые классы (IFC) для обмена и управления данными об объектах строительства. Часть 1. Схема данных. М. : Стандартинформ, 2019. 28 с.

Рис. 1. Схема этапов автоматизированной разработки графика производства работ

ствие между конструктивным элементом здания и технологическим процессом. Процесс выбирается с учетом технологических рамок применения норм, в качестве которых могут быть использованы различные показатели: минимальный и максимальный объем котлована, минимальная и максимальная отметки производства работ, минимальная и максимальная толщина стены или слоя, группа грунта и т.п. В необходимых случаях мелкие процессы могут быть объединены, а крупные — разделены. Этот этап должен явиться предметом отдельного исследования. В настоящей работе предполагается, что такое соответствие уже определено и соответствующие данные по строительным процессам получены в виде таблицы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Задача автоматизированного получения графика работ была исследована путем составления программы на языке C#. Программа считывает промежуточные данные из таблицы формата Excel и создает таблицу такого же формата с одновременным визуальным представлением графика работ.

При этом на этапе составления сетевой модели строительства в качестве исходной информации должны быть получены сведения по строительству в целом и по отдельным конструктивно-технологическим элементам. По зданию (сооружению) в целом предполагается получать следующие данные:

- продолжительность выполнения исходно-разрешительных процедур, определяющих затраты времени на проведение предпроектных работ;
- продолжительность проведения проектных работ на основе назначения, вместимости, строительного объема, полезной площади и других характеристик здания (сооружения);
- этажность здания;
- предполагаемые даты начала и окончания строительства в целом;
- данные о котловане и другая необходимая информация.

Поскольку общих сведений относительно немного, они могут быть введены вручную в режиме диалога. Некоторые данные по работам (средняя категория грунта, уровень грунтовых вод и др.) предполагается получить в интерактивном режиме на предыдущих этапах разработки модели или ввести в промежуточный файл.

Информация по каждому конструктивно-технологическому элементу, получаемая с помощью программ автоматизированного проектирования, должна содержать материалы:

- номер здания (корпуса, сооружения) N_c в проекте строительства;
- номер этажа здания N_f (для котлована, фундамента, подвала используются условные отрицательные номера этажей);

- номер секции N_s на этаже, оси цеха или другого горизонтального членения;
- номер помещения N_p ;
- технические параметры элемента (вес, объем, размер и др.);
- условия протекания процесса (высота, глубина и др.);
- тип технологического процесса (на основании типа IFC-элемента);
- наименование и код процесса (определяются по словарю «элементы-процессы»);
- единица измерения работы;
- объем работы;
- указание на норматив затрат труда (машинного времени, стоимости);
- приоритет процесса N_p (определяется по универсальной последовательности);
- указание на исполнителя работ;
- указание на ведущую машину (комплект);
- указание на предшествующие процессы.

Номера здания, этажа, секции и помещения определяют захватку, на которой производятся работы. Они могут быть получены средствами САПР или назначены на предыдущих этапах реализации алгоритма.

Наименование и код процесса могут быть выбраны автоматически по словарю «элементы-процессы» или назначены на предыдущем этапе трансформации. При составлении графика производства работ наименование процесса отражается на графике; дополнительно может быть указано наименование используемого норматива трудозатрат.

Тип процесса, а также технические характеристики элемента и условия протекания процесса используются для автоматизированного подбора норматива трудозатрат. Если норматив уже указан на предыдущей стадии реализации алгоритма, эти показатели не используются. В то же время тип процесса может влиять на его приоритет, т.е. последовательность процессов на одной и той же захватке.

Если единица измерения процесса не совпадает с единицей измерения норматива, объем работы автоматически пересчитывается. Если же единицы измерения процесса и норматива не сочетаются (например, метры и килограммы), будет выдано предупреждение.

Номер процесса может быть указан автоматически или изменен вручную. Порядок номеров не имеет значения, программа сортирует процессы в технологически нужной последовательности. Если пользователь дает нескольким записям один и тот же номер, эти процессы объединяются в один. При этом суммируются затраты труда, машинного времени, но объем и наименование работ указываются по первой объединяемой записи.

В зависимости от ситуации исполнитель работ может быть подобран автоматически или указан

по его наименованию. То же относится к ведущему комплексу машин (см. ниже).

Указание на предшествующие процессы необходимо далеко не всегда. В большинстве случаев последовательность процессов определяется по универсальной последовательности (приоритету) — чем меньше приоритет, тем раньше выполняется работа. Однако нельзя исключать ситуаций, когда пользователь должен вмешаться в работу алгоритма на промежуточном этапе и указать дополнительную связь между процессами. В этом случае в графе «Предшествующий процесс» указывается номер того процесса, который обязательно должен быть выполнен перед данным.

Кроме сведений о конкретном проекте, необходимо создавать и использовать организационно-технологическую базу данных. Она может состоять из трех частей: данные о технологических процессах, о строительных машинах и механизмах, об исполнителях работ (субподрядных фирмах, подразделениях, бригадах). Рассматриваемый алгоритм может быть использован в двух основных режимах: для предварительной оценки длительности строительных процессов (например, при составлении ПОС) и для управления сроками проекта на фазе его выполнения. В первом случае данные могут приниматься ориентировочно, а во втором случае они должны быть ориентированы на реальную структуру организации строительства.

Для предварительных расчетов некоторые данные могут быть приняты как константы, например: количество рабочих часов в день при односменной, двухсменной или трехсменной работе, число календарных и рабочих дней в месяце. Дополнительно могут быть заданы коэффициенты снижения производительности при выполнении непрофильных работ.

В зависимости от ситуации задаются или определяются характеристики исполнителей. Если подрядчик не известен, что присуще договорным кампаниям с бюджетным финансированием, характеристики исполнителей могут быть приняты условно. К таким характеристикам относятся:

- количество основных работников (за исключением административно-управленческого и младшего обслуживающего персонала, охраны и т.п.);
- выработка на основного работника, руб./чел.-ч;
- типичная сменность работ в сутки и др.

Далее для механизированных процессов необходимо определить ведущий комплект строительных машин, определяющий длительность работы; часто ведущей может быть одна строительная машина. Ведущая машина должна быть определена при составлении базы данных на основании элементных норм. По каждой машине в базу данных необходимо включить информацию:

- наименование машины или комплекта;
- код по классификатору строительных ресурсов;

- характерный показатель (грузоподъемность, емкость ковша и т.п.);
- типичное количество машино-часов (занятость) в рабочие сутки;
- владелец машины (фирма или подразделение).

В частности, занятость машин может быть определена по Методическим рекомендациям Минстроя РФ² в размере, как правило, от 9 до 18 часов в сутки. При совместной работе субподрядчиков в зоне действия грузоподъемных кранов может быть реализовано разделение рабочего времени машин между ними.

Самой крупной частью рассматриваемой совокупности данных является база данных о технологических процессах. Большое количество норм затрат труда в строительстве и в промышленности применялось в 1980-х гг., когда были выпущены единые нормы и расценки на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы (ЕНиР), ведомственные нормы и расценки (ВНиР), различные укрупненные нормы. Однако с тех пор это направление не развивалось. После 2000 г. практически единственным видом нормирования затрат труда и машинного времени остались элементные сметные нормы, в которых эти затраты были необходимым элементом для расчета стоимости. Поэтому вынужденным решением, если не считать собственных норм выработки строительных фирм, является использование сметных норм для расчета затрат труда и машинного времени, хотя они исходно не были предназначены для этого. Отклонение фактического времени выполнения работ от нормативного можно компенсировать корректирующими коэффициентами.

Среди используемых норм можно выделить государственные элементные сметные нормы (ГЭСН-2020), территориальные сметные нормативы для Москвы (ТСН-2001), нормативы цены строительства (НЦС-2020), сборники базовых цен на проектные и изыскательские работы (СБЦ), московские региональные рекомендации (МРР). Последние три вида нормативов не содержат прямых указаний на затраты времени, однако они могут быть использованы в этих целях через выработку (см. ниже).

В состав записи о технологическом процессе может входить:

- код по классификации элементных или укрупненных норм;
- наименование технологического процесса;
- единица измерения объема работ;
- указание на ведущую машину (ведущий комплект);
- удельные затраты труда рабочих на единицу измерения, чел.-ч;

² Методические рекомендации по определению сметных цен на эксплуатацию машин и механизмов : утв. Приказом Минстроя РФ от 04.09.2019 № 513/пр.

- удельные затраты труда машинистов на единицу измерения, чел.-ч;
- удельные затраты машинного времени ведущей машины (комплекта), маш.-ч.

Сочетание файлов базы данных и файла проекта позволяет разделить постоянную и переменную часть информации для различных проектов. Алгоритм работает следующим образом.

Вначале в память загружается описанная выше база данных с записями данных в трех таблицах: нормативы затрат труда, машины и исполнители. Затем загружается файл проекта с записями данных в двух таблицах: общие данные и информация по процессам. В первую очередь проверяется графа «Объем работ». Если эта графа записи пустая, строка пропускается. Считываются только записи между словами «begin» и «end» в графе объемов, поэтому можно загружать любую часть проекта или весь проект целиком. При этом проверяется нахождение числовых значений исходных данных в разумных пределах; в случае ошибок выдаются соответствующие предупреждения. Записи с одинаковыми номерами процесса объединяются в один процесс, как указано выше, в остальных случаях на каждую запись создается отдельный процесс.

После загрузки исходной информации пользователь может установить начальную дату проекта и директивную дату окончания проекта. Если директивная дата окажется раньше расчетного окончания проекта, на всех работах критического пути частный резерв будет равен отставанию от директивной даты, в противном случае резерв критических работ равен нулю.

Создание и расчет модели производится в три этапа (рис. 2). На первом этапе для каждого процесса вычисляется объединенный «индекс приоритетности». Например, для вертикального направления потока, если наибольшее значение каждой переменной не превышает 99 (для помещений — 999, для приоритета работ — 999 999), объединенный индекс вычисляется по формуле:

$$K_p = \{(N_c \cdot 100 + (N_f + 20) \cdot 100 + N_s) \times 1000 + N_p\} \cdot 1\,000\,000 + N_r. \quad (1)$$

Значение индекса при этом не превышает 10^{15} , что меньше максимального значения для целочисленной переменной типа *Int64*, которое равно $\pm 9,22 \cdot 10^{18}$. Число «20» в формуле введено для возможности указания отрицательного номера этажа. Для горизонтального направления потока номера этажей и секций меняются местами.

Индекс приоритетности построен таким образом, что каждый следующий процесс в ходе строительства имеет большую или равную величину индекса, чем предыдущий процесс, например, работа с приоритетом 200326, выполняемая в 25-м помещении во 2-й секции 3-го надземного этажа 1-го корпуса будет иметь объединенный индекс

12302025200326. Затем работы сортируются в порядке увеличения индекса приоритетности.

Для работ, выполняемых последовательно на одной захватке, создаются прямые связи с последующими процессами и обратные связи с предшествующими процессами — это делается для быстрого проведения расчетов ранних и поздних сроков. Для первой работы по возведению несущих конструкций на каждой захватке должна создаваться связь с окончанием работ по возведению несущих конструкций на предыдущем этаже. Признак несущих конструкций следует определять по типу процесса. Кроме того, для многоэтажных зданий должна учитываться необходимость наличия нескольких верхних перекрытий перед началом работ по устройству ограждающих конструкций и покрытий.

Затем устанавливаются связи с предшествующей работой того же исполнителя. Этим моделируются переходы исполнителей с одной захватки на другую. Для строительных машин, принадлежащих генподрядчику, необходимо устанавливать связи между процессами, последовательно использующими одну и ту же машину: тем самым также моделируются переходы машин с одной захватки на другую. При переходе исполнителей на другую захватку к продолжительности работы может добавляться время на организационный перерыв (например, 1 ч при переходе в другую секцию и 2–3 ч при переходе на другой этаж). Если при переходе меняется номер корпуса, для подъемных кранов и некоторых других типов машин добавляется длительность перебазировки машины, которая может составить несколько дней и даже недель. Примерное время перехода устанавливается в характеристиках исполнителя.

Наконец, добавляются связи, указанные пользователем в файле проекта. Здесь надо соблюдать определенную осторожность, так как непродуманные добавления связей могут привести к закликиванию. От закликивания программы установлена блокировка, однако показатели тем не менее, могут быть искажены против ожидаемых результатов.

На втором этапе рассчитывается продолжительность каждого процесса. При этом она определяется как максимальная из трех величин:

$$T = \max\{T_w, T_m, T_c\}, \quad (2)$$

где T_w — продолжительность, вычисленная на основании трудозатрат; T_m — продолжительность, вычисленная на основании затрат машинного времени; T_c — продолжительность, вычисленная на основании стоимости работ.

Целесообразность введения формулы (2) видна из разделения строительных машин на ведущие и обслуживающие [24]. У ведущих машин (землеройная, дорожная техника и т.п.) темп работы определяется их производительностью, а у обслуживающих машин (подъемные краны, бетоноукладчики и др.) — количеством рабочих, занятых на основ-

Рис. 2. Последовательность создания и расчета сетевой модели

ных строительных процессах. Если же затраты труда и машинного времени не известны, то $T_w = 0$ и $T_m = 0$, а продолжительность процесса можно определить с помощью заданной выработки.

Формулы для вычисления указанных величин, в рабочих днях, очевидны:

$$T_w = \frac{LA}{hN_w}; \quad (3)$$

$$T_m = \frac{MA}{h_m N_m}; \quad (4)$$

$$T_c = \frac{C}{B_w h N_w}, \quad (5)$$

где A — объем работы процесса; L — удельные трудозатраты на единицу объема, чел.-ч; M — удельные затраты времени машины (комплекта) на единицу объема, ч; h — полезная длительность смены, ч/день; h_m — занятость машины, ч/день; N_w — численность рабочих исполнителя; N_m — численность однородных машин (комплектов) исполнителя; C — сметная стоимость работ, руб.; B_w — выработка по сметной стоимости, руб./чел.-ч.

Продолжительность переводится в календарные дни с помощью среднего соотношения рабочих и календарных дней и округляется. К продолжительности может добавляться технологический перерыв, указываемый в характеристиках процесса (сушка, твердение и т.п.). В том случае, если в исходных данных процесса объем работ указан непосредственно в единицах времени (час, день, месяц), продолжительность определяется на основании этого числа в рабочих или календарных днях.

Затем производится расчет ранних сроков начала и окончания процессов по известным формулам сетевого планирования и управления³.

На третьем этапе рассчитываются поздние сроки начала и окончания процессов, а также частные резервы. Полные резервы не показываются пользователю, так как они обладают некоторыми «коварными» свойствами: полный резерв относится не к одной работе, а к некоторому частичному пути, поэтому использование резерва на одной работе исключает его использование на остальных работах частичного пути.

Программа выдает рассчитанную информацию в виде файла Excel и графической диаграммы. От-

ставание от директивного срока окончания строительства показывается пользователю в виде предупреждения.

ВЫВОДЫ

Исследования показали, что задача автоматизированного создания структуры сетевого графика на основе данных BIM-моделей может быть успешно решена. Однако для этого необходимо провести значительную подготовительную работу по созданию баз данных не только затрат труда и производительности машин, но и соответствия элементов и работ. Разработанная методика позволяет автоматизировать процессы создания календарных планов на основе перечня элементов здания и универсальной последовательности проведения работ. На любом этапе реализации могут быть интерактивно внесены изменения и дополнения в перечень работ. В дальнейшем необходимо сформировать набор параметров конструктивных элементов, которые дадут возможность автоматизировать выбор технологических процессов.

Описанный алгоритм может способствовать созданию графика производства работ в полуавтоматическом режиме как при подробном задании технологической информации, так и при недостатке ее на проектном и даже предпроектном этапе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hartmann T., van Meerveld H., Vosseveld N., Adriaanse A. Aligning building information model tools and construction management methods // *Automation in Construction*. 2012. Vol. 22. Pp. 605–613. DOI: 10.1016/j.autcon.2011.12.011
2. Belsky M., Sacks R., Brilakis I. Semantic enrichment for building information modeling // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2015. Vol. 31 (4). Pp. 261–274. DOI: 10.1111/mice.12128
3. Eadie R., Browne M., Odeyinka H., McKeeown C., McNiff S. BIM implementation throughout the UK construction project lifecycle: an analysis // *Automation in Construction*. 2013. Vol. 36. Pp. 145–151. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.09.001
4. Soltani S. The contributions of building information modelling to sustainable construction // *World Journal of Engineering and Technology*. 2016. Vol. 04. Issue 02. Pp. 193–199. DOI: 10.4236/wjet.2016.42018
5. Kivits R.A., Furneaux C. BIM: enabling sustainability and asset management through knowledge management // *The Scientific World Journal*. 2013. Vol. 2013. Pp. 1–14. DOI: 10.1155/2013/983721
6. Mellado F., Lou E.C.W. Building information modelling, lean and sustainability: An integration

framework to promote performance improvements in the construction industry // *Sustainable Cities and Society*. 2020. Vol. 61. P. 102355. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102355

7. Li Y-W., Cao K. Establishment and application of intelligent city building information model based on BP neural network model // *Computer Communications*. 2020. Vol. 153. Pp. 382–389. DOI: 10.1016/j.comcom.2020.02.013

8. Sacks R., Girolami M., Brilakis I. Building information modelling, artificial intelligence and construction tech // *Developments in the Built Environment*. 2020. P. 100011. DOI: 10.1016/j.dibe.2020.100011

9. Bettemir Ö.H. Experimental design for genetic algorithm simulated annealing for time cost trade-off problems // *International Journal of Engineering & Applied Sciences*. 2011. Vol. 3. Issue 1. Pp. 15–26.

10. Гинзбург А.В., Куликова Е.Н., Павлов А.С., Вайнштейн М.С. Обеспечение интероперабельности при проектировании с применением технологий информационного моделирования // *Вестник Евразийской науки*. 2019. Т. 11. № 6. С. 69. URL: <https://esj.today/PDF/25SAVN619.pdf>

11. Grilo A., Jardim-Goncalves R. Value proposition on interoperability of BIM and collaborative working Environments // *Automation in Construction*. 2010. Vol. 19. Issue 5. Pp. 522–530. DOI: 10.1016/j.autcon.2009.11.003
12. Wu J., Zhang J. New automated BIM object classification method to support BIM interoperability // *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2019. Vol. 33. Issue 5. P. 04019033. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000858
13. Chen Ch., Tang L. BIM-based integrated management workflow design for schedule and cost planning of building fabric maintenance // *Automation in Construction*. 2019. Vol. 107. P. 102944. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102944
14. Benghi C. Automated verification for collaborative workflows in a digital plan of work // *Automation in Construction*. 2019. Vol. 107. P. 102926. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102926
15. Каракозова И.В., Малыха Г.Г., Куликова Е.Н., Павлов А.С., Панин А.С. Организационное сопровождение BIM-технологий // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 12. С. 1628–1637. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.12.1628-1637
16. Каракозова И.В., Малыха Г.Г., Павлов А.С., Панин А.С., Теслер Н.Д. Исследование подготовительных работ для использования BIM-технологий на примере проектирования медицинских организаций // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 1. С. 100–111. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.100-111
17. Тарасенко Д.С. Автоматизация процессов планирования строительного производства промышленных объектов : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М. : МАДИ, 2008. 25 с.
18. Эльшейх А.М.Ф.М.А. Информационное моделирование интегрированной автоматизации проектирования и календарного планирования в строительстве : дисс. ... канд. техн. наук. М. : МГСУ, 2015. 139 с.
19. Ильягуева М.А., Коридзе Э.З. Автоматизация проектирования топологии сетевых моделей // *Вестник ДГТУ*. 2009. № 12. С. 22–27.
20. Павлов А.С., Гинзбург А.В., Гусакова Е.А., Каган П.Б. Управление крупномасштабными проектами строительства промышленных объектов: монография. М. : МИСИ–МГСУ, 2019. 188 с.
21. Павлов А.С. Передача информации и распознавание объектов в системах строительного проектирования. М. : Новое тысячелетие, 2003. 269 с.
22. Eastman Ch., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM handbook: A guide to building information modeling for owners. New Jersey : Wiley, 2018. 681 p.
23. East B. Construction-operation building information exchange (COBie). WBDG, 2016. URL: <https://wbdg.org/resources/construction-operationsbuilding-information-exchange-cobie>
24. Павлов А.С., Каракозова И.В. Использование ресурсов в строительных организациях. М. : Архитектура-С, 2009. 97 с.

Поступила в редакцию 17 июля 2020 г.

Принята в доработанном виде 10 августа 2020 г.

Одобрена для публикации 31 августа 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Ирина Викторовна Каракозова — кандидат технических наук, доцент, начальник отдела методологии разработки и актуализации нормативно-методических документов в строительстве; Государственное автономное учреждение города Москвы «Научно-исследовательский аналитический центр» (ГАН ИИАЦ); 125047, г. Москва, ул. 1-я Брестская, д. 27; доцент кафедры менеджмент и инновации; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 4750-3869, Scopus: 57190864252; i.kar@inbox.ru;

Александр Сергеевич Павлов — доктор технических наук, профессор, заместитель руководителя департамента экспертизы и оптимизации проектных решений; Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций (ВНИИАЭС); 109507, г. Москва, ул. Ферганская, 25; РИНЦ ID: 79850, ORCID: 0000-0001-6638-5554; a.s.pavlov@inbox.ru.

INTRODUCTION

Building information modeling is the main direction of development of automated design and control systems [1]. An important component of information modeling is the transfer of data into construction management systems during the construction project life cycle [2, 3]. Sustainable development of construction processes and improvement of work organization without improv-

ing information technologies is already unthinkable [4–6]. Elements of artificial intelligence [7, 8], genetic algorithms [9], and other software tools are also widely used.

As it has been repeatedly stated, the greatest interoperability issues arise between various areas of design and production, in particular, in data transfer from architectural and engineering drawings obtained by

automated means [10–12]. The key link in creation of information technology for construction is automated progress schedule compilation, namely, compilation of a network model based on the work item list obtained as a result of CAD systems' operation [13, 14].

The architectural and engineering drawing data can be presented in the form of a table of records, each of which represents some element of the construction project. Such a record may contain data that allow recognition of the properties of each element set by the project designer (architect, planner, specialist in various design sections) [15, 16]. At the same time, this information is not always sufficient to compile a progress schedule and create the appropriate sections of technical documentation (construction method statements, work plans, production plans) required for contracting and work planning [17]. Therefore, the methods of automated compilation of construction schedules are rarely studied and are marginally related to the BIM design technology [18, 19].

Note that problems often arise in the final parts of the first design stage, when it is necessary to determine the contract terms while production drawings are not yet available. In addition, progress schedule is compiled over a short time, as it is usually carried out at the end of the first design stage, the terms of which are limited by the contract and regulatory conditions. Such a schedule, which determines the total construction period, is necessary for both the customer and the contractor.

Let us outline the main issues that arise at this stage:

- lack of a method (algorithm) for automated compilation of a network model and a work schedule based on a list of architectural and construction elements;
- based on the results of automated design, it is generally impossible to understand the results of technological processes that are not expressed in the physical elements of the finished building or structure: foundation pits, trenches, scaffolds, technological devices,

temporary construction facilities, etc. This issue is noted in foreign studies as well [2];

- in some cases, the drawings of the first design stage corresponding to approximately LOD 300 [20] lack the details of the building structure representation needed to fully describe the work processes. The architect is often not interested in participating in the development of technological details or has no ability to do so [15];

- during this period, the estimate documents are still being developed and not always can serve as a basis for progress schedule compilation;

- in case the construction project has public funding, the potential contractor is not known to the government (municipal) customer as the tender is not held at that point. Therefore, the exact data on the used technology and work organization is not available to the designer.

Due to this, there is a need to develop a method of automated network schedule compilation based on BIM technologies used in the early design stages and further.

MATERIALS AND METHODS

Let us consider the possibility of creating a method (algorithm) for automated network model compilation. As a result of the schedule compilation analysis, it is proposed to divide the algorithm into several conversion stages that sequentially pass the information to the next stage. For the first time, a staged CAD data transmission and recognition plan was proposed in the following work [21]. Currently, these stages can be (Fig. 1):

- output of ordinal architectural and structural element data by CAD tools;
- supplementing the data with technological processes not reflected by architectural and structural elements;
- selection of data on labor costs and machine time expenditure;

Fig. 1. Automated work schedule development roadmap

- determination of the work sequence, compilation of the topological network model and calculation of the construction work schedule.

The first stage of the specified sequence is usually provided by CAD software based on information technologies [22]. Such software as ArchiCAD, Nemetschek, Revit, etc. can be used as examples. Data is often output in text formats IFC¹ and COBie [23] in the form of Excel tables.

Excel spreadsheet files are offered as an intermediate data transfer format, allowing not only to read and write data, but also allowing a specialist to view and correct them. Other formats, specifically text files and database formats, can also be used. In this case, the stages of automated information processing alternate with the user data control stages (refer to Fig. 1).

For the automated selection of technologies, estimate selection, auxiliary cost and work conditions management, it is necessary to create “dictionaries”, which determine the correspondence between the structural elements of the building and the technological process. The process is selected with consideration of the technological boundaries of estimate application, for which different indicators are used: minimum and maximum foundation pit volume, minimum and maximum work points, minimum and maximum wall or layer thickness, soil group, etc. Where necessary, minor processes can be merged, and the major processes can be separated. This stage should be a subject of a separate study. In this paper it is assumed that such correspondence has already been defined and the corresponding data on construction processes have been obtained in the form of a table.

RESULTS

The task of automated work schedule determination has been studied by means of creating a C# program. The program reads intermediate data from an Excel table and creates a table of the same format with simultaneous visual presentation of the work schedule.

Moreover, at the network construction model compilation stage, the data on the construction as a whole and on separate structural and technological elements should be obtained as the initial information. The following data needs to be collected from the building (structure) as a whole:

- duration of preliminary permission activities that determine the time expenditure for pre-project work;
- duration of the design work on the basis of function, capacity, structural volume, usable area and other building (structure) specifications;
- number of stories;

- estimated work commencement and completion of construction as a whole;
- foundation pit data and other required information.

Since the general data is relatively few, it can be entered manually in the interactive mode. Some work data (average class of soil, subterranean water level, etc.) are supposed to be determined interactively on the previous model development stages or input into an intermediary file.

The information on each structural and technological element, obtained using CAD software, should contain the following materials:

- building (structure) number N_c in the construction project;
- building storey number N_f (foundation pits, foundations and basements use conditional negative storey numbers);
- number of storey section N_s , workshop axis or other horizontal articulation;
- room number N_r ;
- element engineering data (weight, volume, size, etc.);
- process conditions (height, depth, etc.);
- technological process type (based on the IFC element type);
- process name and code (determined using the elements – processes dictionary);
- work measurement unit;
- work content;
- labor expenditure (machine time, cost) regulation reference;
- process priority N_p (determined using the universal sequence);
- work performer reference;
- master machine (set) reference;
- previous process reference.

Building, storey, section and room numbers define the bay where the works will be performed. They can be obtained using CAD tools or designated during the previous algorithm implementation stages.

Process name and code can be selected automatically in accordance with the elements-processes dictionary or set during the previous conversion stage. During work schedule compilation, the name of the process is disabled on the schedule; in addition, the name of the labor cost standard used can also be specified.

Process type, element specifications and process conditions are used for automated labor cost standard selection. If the standard is already specified at the previous algorithm implementation stage, these values are not used. At the same time, process type can affect its priority, i.e. the sequence of processes in a single bay.

If the process measurement unit does not match the standard measurement unit, work content is automatically recalculated. If the process and standard measurement units don't match (i.e., meters and kilograms), a warning message will be issued.

¹ GOST R 10.0.02-2019 / ISO 16739-1:2018. Building and structure information modeling standard system. Industry Foundation Classes (IFC) for construction site data transfer and management. Part 1. Data diagram. Moscow, Standartinform publ., 2019; 28.

Process number can be set automatically or changed manually. Number sequence does not matter, the program sorts processes in the sequence required for the process. If the user assigns the same number to multiple records, these processes will be merged. This involves summing up the labor expenditure and the machine time, while the work content and name are specified in accordance with the first mergeable record.

Depending on the situation, the work performer can be selected automatically or specified by its name. The same applies to the master machine set (see below).

Previous process references are not always necessary. In most cases, the process sequence is determined by the universal sequence (priority) — the lower the priority, the earlier the work is performed. However, we cannot rule out situations when the user should interfere with the algorithm at an intermediate stage and specify additional connection between processes. In this case, the number of the process that must be executed before the current one is specified in the Previous Process column.

In addition to information about a particular project, an organizational and technological database should be created and used. It can consist of three parts: technological process data, building machine and mechanism data, contractor data (subcontracting companies, divisions, teams). The algorithm under examination may be used in two main modes: for preliminary construction procedure duration evaluation (e.g., when compiling a construction method statement) and for project timescale management during its implementation. In the first case, the data can be taken as approximate, and in the second case, they should be geared towards the real construction organization structure.

For preliminary calculations, some data may be accepted as constants, for example: number of work-hours per day for single-shift, two-shift or three-shift work, number of calendar and working days in a month. In addition, productivity reduction coefficients for non-core works can be set.

Performer specifications are set or determined depending on the situation. If the contractor is not known, which is typical for contractual campaigns with public funding, the performer specifications may be accepted conditionally. Such specifications include:

- number of direct employees (except for administrative and managerial staff, junior maintenance personnel, security staff, etc.);
- output per direct employee, rubles/man-hour;
- typical work shift system per day, etc.

After that, for mechanized processes, it is necessary to define a master construction machine set determining the work duration; often, one construction machine can be a master. The master machine should be determined when compiling the database on the basis of element estimates. The following information for each machine should be included in the database:

- name of machine or set;

- building resource classifier code;
- distinctive indicator (load carrying capacity, bucket capacity, etc.);
- typical number of machine-hours (occupation) per operating day;
- machine owner (company or division).

In particular, machine occupation can be determined in accordance with the Recommended Practices of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation² in the typical amount from 9 to 18 hours per day. In case of cooperative work between multiple subcontractors in the lifting crane operation site, machine work time division can be established between them.

The largest part of the data set under consideration is the technological processes database. A large number of labor cost estimates in construction and industry were applied in the 1980s, when unified standards and rates for construction, installation and repair work (ENiR), departmental estimates and rates (VNiR), as well various enlarged estimates, were issued. However, this direction has seen little development since then. After 2000, almost the only type of labor and machine time expenditure rationing remained element estimate standards, in which these expenditures were a necessary element for cost calculation. Therefore, the use of estimate standards for calculation of labor and machine time expenditures, though they were not initially intended for it, is a forced decision, if not counting construction companies' own output norms. The deviation of actual work performance time from the standard can be compensated by adjustment factors.

Among the used standards, the state element estimate standards (GESN-2020), territorial estimate standards for Moscow (TSN-2001), construction price standards (NTS-2020), collections of basic prices for design and survey works (SBTs), and Moscow regional recommendations (MRR) can be highlighted. The last three types of standards do not contain any direct indications of time expenditures, but they can be used for this purpose through generation (see below).

Technological process record can include:

- element and enlarged standard classification code;
- name of the technological process;
- work content measurement unit;
- master machine (master set) reference;
- worker labor cost per measurement unit, man-hours;
- machine operator labor cost per measurement unit, man-hours;
- master machine (set) time expenditure per unit, machine hours.

² Recommended practices for determining cost estimates for machine and mechanism operation : approved by the Order of the Ministry of Construction of the Russian Federation on. 04.09.2019 No. 513/pr.

Combination of database files and project file allows separating constant and variable information for different projects. The algorithm works as follows.

First, the database described above with data records in the following three tables is loaded into memory: labor expenditure standards, machines and performers. After, the project file with data records in two following tables is loaded: general data and process information. The work content field is checked first. If this entry field is empty, the string is skipped. Only records between the words “begin” and “end” in the work content column are read, so it's possible to load the whole project or any of its parts. At the same time, the source data numerical values are checked for being within reasonable limits; in case of errors, the corresponding warning messages are issued. Records with the same process number are merged into one process as described above, in other cases a separate process is created for each record.

After loading the source information, the user can set the project start date and the project termination date. If the target date is earlier than the estimated project termination date, the local reserves for all the critical path works will be equal to the delay from the target date; otherwise, the reserve for critical path works will be equal to zero.

The model creation and calculation is performed in three stages (Fig. 2). During the first stage, the unified “priority index” is calculated for each process. For example, for vertical flow direction, if maximum value of each variable does not exceed 99 (999 for rooms, 999 999 for work priority), united index is calculated using the following formula:

$$K_p = \{(N_c \cdot 100 + (N_f + 20) \cdot 100 + N_s) \times 1000 + N_r\} \cdot 1\,000\,000 + N_p. \quad (1)$$

At the same time, the index value does not exceed 10^{15} , which is lower than the maximum *Int64* integer variable value, which equals $\pm 9.22 \cdot 10^{18}$. The number 20 is present in the formula in order to be able to specify a negative storey number. For horizontal stream direction, the storey numbers and section numbers are switched.

The priority index is set in such a way, that each following process during construction has a larger or equal index value than the previous process, e.g. work with priority value 200326, performed in the 25th room in the 2nd section of the 3rd elevated storey of the 1st building will have the combined index value of 12302025200326. Then the works are sorted in the order of priority index increase.

For works carried out sequentially in a single bay, direct connections to subsequent processes and reverse connections to previous processes are created — this is done for quick calculations of early and late terms. For the first load-bearing structure erection work, a connection with the end of load-bearing structure erection work on the previous storey should be created for each

bay. Load-bearing structure qualities should be determined by the process type. In addition, for multi-storey buildings the need for multiple upper floor slabs before starting work on the construction of enclosure structures and covering structures should be taken into account.

After, the connections with the performer's previous works are established. This simulates the transition of performers from one bay to another. For construction machines owned by the general contractor it is necessary to establish links between processes that consistently use the same machine: this also simulates the transition of machines from one bay to another. During the transition of performers to another bay, the set-up interval can be added to the work duration (e.g. 1 hour when moving to another section, and 2–3 hours when moving to another storey). If the building number changes during the transition, machine relocation time is added for lifting cranes and some other machine types; machine relocation time may be equal to multiple days or even weeks. The approximate transition time is set in the performer specifications.

Lastly, the connections specified by the user in the project file are added. Certain caution should be exercised, as inadvertent connection additions may lead to looping. The program is set to block loops, but the indicators may still be distorted compared to the expected results.

At the second stage, the duration of each process is calculated. It is defined as the maximum of three values:

$$T = \max \{T_w, T_m, T_c\}, \quad (2)$$

where T_w is the duration calculated on the basis of labor expenditure; T_m is the duration calculated on the basis of machine time expenditure; T_c is the duration calculated on the basis of work cost.

Formula (2) introduction feasibility is evident from the division of construction machines into master machines and auxiliary machines. Master machine (excavation machines, road-building machines, etc.) work pace is determined by their performance, while the auxiliary machine (lifting cranes, concrete spreaders, etc.) work pace is determined by the number of workers engaged in primary construction processes. If the labor and machine time expenditures are not known, then $T_w = 0$ and $T_m = 0$, while the process duration can be determined using the set output.

Formulae for calculating the specified values in workdays are obvious:

$$T_w = \frac{LA}{hN_w}; \quad (3)$$

$$T_m = \frac{MA}{h_m N_m}; \quad (4)$$

$$T_c = \frac{C}{B_w h N_w}, \quad (5)$$

where A is the process work content; L is the labor cost per unit; M is the machine (set) time expenditure

Fig. 2. Network model creation and calculation sequence

per work content unit, h ; h is the effective shift duration, h/day; h_m is the machine occupation, h/day; N_w is the quantity of performer workers; N_m is the quantity of performer uniform machines (sets); C is the estimated work cost, rub.; B_w is the output per estimated cost, rub./man-hour.

The duration is translated into calendar days using the average working days to calendar days ratio and rounded off. Routine breaks specified in the process specifications may also be added (drying, hardening, etc.). If the work content in the process source data is

specified directly in time measurement units (hour, day, month), the duration is determined using this value in workdays or calendar days.

After, the calculation of early process start and end dates using the known network planning and management formulae is performed³.

³ Guskova E.A., Pavlov A.S. Basics of organization and management in construction : textbook, in 2 vols. Moscow, Yurait publ., 2016.

At the third stage, the late process start and end dates, as well as local reserves, are calculated. Full reserves are not available for viewing by the user, as they have some misleading properties: the full reserve applies not to one work, but to some partial path, so using the reserve with one work excludes its use on other works of a partial path.

The program outputs the calculated information as an Excel file and a graphic chart. Lagging behind the target construction completion terms is shown to the user as a warning message.

CONCLUSIONS

The research has shown that the task of automated creation of project network structures based on BIM

models' data can be successfully solved. However, this requires significant preparatory work to create databases of not only the labor costs and machine performance, but also the element and work compliance. The developed method allows for automation of the processes of creating construction plans based on the list of building elements and universal work sequence. At any implementation stage, the work item list may be interactively changed and supplemented. In the future, it is necessary to form a set of parameters for structural elements that will allow automating the choice of technological processes.

The described algorithm can contribute to the creation of work schedule in semi-automatic mode both with setting detailed technological information and with the lack of it at design and even pre-project stage.

REFERENCES

1. Hartmann T., van Meerveld H., Vosseveld N., Adriaanse A. Aligning building information model tools and construction management methods. *Automation in Construction*. 2012; 22:605-613. DOI: 10.1016/j.autcon.2011.12.011
2. Belsky M., Sacks R., Brilakis I. Semantic enrichment for building information modeling. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2015; 31(4):261-274. DOI: 10.1111/mice.12128
3. Eadie R., Browne M., Odeyinka H., McKewen C., McNiff S. BIM implementation throughout the UK construction project lifecycle: an analysis. *Automation in Construction*. 2013; 36:145-151. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.09.001
4. Soltani S. The contributions of building information modelling to sustainable construction. *World Journal of Engineering and Technology*. 2016; 04(02):193-199. DOI: 10.4236/wjet.2016.42018
5. Kivits R.A., Furneaux C. BIM: enabling sustainability and asset management through knowledge management. *The Scientific World Journal*. 2013; 2013:1-14. DOI: 10.1155/2013/983721
6. Mellado F., Lou E.C.W. Building information modelling, lean and sustainability: An integration framework to promote performance improvements in the construction industry. *Sustainable Cities and Society*. 2020; 61:102355. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102355
7. Li Y-W., Cao K. Establishment and application of intelligent city building information model based on BP neural network model. *Computer Communications*. 2020; 153:382-389. DOI: 10.1016/j.comcom.2020.02.013
8. Sacks R., Girolami M., Brilakis I. Building information modelling, artificial intelligence and construction tech. *Developments in the Built Environment*. 2020; 100011. DOI: 10.1016/j.dibe.2020.100011
9. Bettemir Ö.H. Experimental design for genetic algorithm simulated annealing for time cost trade-off problems. *International Journal of Engineering & Applied Sciences*. 2011; 3(1):15-26.
10. Ginzburg A.V., Kulikova E.N., Pavlov A.S., Vainshtein M.S. Interoperability in construction design by means of information modeling technologies. *The Eurasian Scientific Journal*. 2019; 6(11):69. URL: <https://esj.today/PDF/25SAVN619.pdf> (rus.).
11. Grilo A., Jardim-Goncalves R. Value proposition on interoperability of BIM and collaborative working Environments. *Automation in Construction*. 2010; 19(5):522-530. DOI: 10.1016/j.autcon.2009.11.003
12. Wu J., Zhang J. New automated BIM object classification method to support BIM interoperability. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2019; 33(5):04019033. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000858
13. Chen Ch., Tang L. BIM-based integrated management workflow design for schedule and cost planning of building fabric maintenance. *Automation in Construction*. 2019; 107:102944. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102944
14. Benghi C. Automated verification for collaborative workflows in a digital plan of work. *Automation in Construction*. 2019; 107:102926. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102926
15. Karakozova I.V., Malycha G.G., Kulikova E.N., Pavlov A.S., Panin A.S. Organizational support of BIM-technologies. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14:1628-1637. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.12.1628-1637 (rus.).
16. Karakozova I.V., Malycha G.G., Pavlov A.S., Panin A.S., Tesler N.D. Study of preparatory works for the use of BIM-technologies in the medical enterprises design. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State

University of Civil Engineering]. 2020; 15:100-111. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.100-111

17. Tarasenko D.S. *Automation of planning processes for construction production of industrial facilities: abstract of the dissertation*. Moscow, 2008; 25. (rus.).

18. Elsheikh A. *Information modeling of integrated design automation and scheduling in construction: dissertation*. Moscow, MGSU, 2015; 139. (rus.).

19. Ilyagueva M.A., Koridze E.Z. Automation of network model topology design. *Herald of Daghestan state technical university. Technical sciences*. 2009; 12:22-27. (rus.).

20. Pavlov A.S., Ginzburg A.V., Gusakova E.A., Kagan P.B. *Management of large-scale projects for the construction of industrial facilities : monograph*.

Moscow, Publishing house MISI–MGSU, 2019; 188. (rus.).

21. Pavlov A.S. *Data transfer and object recognition in building design systems*. Moscow, New Millennium publ., 2003; 259. (rus.).

22. Eastman Ch., Teicholz P., Sacks R., Liston K. *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners*. New Jersey, Wiley, 2018; 681.

23. East B. *Construction-operation building information exchange (COBie)*. WBDG, 2016. URL: <https://wbdg.org/resources/construction-operationsbuilding-information-exchange-cobie>

24. Pavlov A.S., Karakozova I.V. *Resource usage in construction firms*. Moscow, Architecture-S Publ., 2009; 97. (rus.).

Received July 17, 2020.

Adopted in revised form on August 10, 2020.

Approved for publication on August 31, 2020.

B I O N O T E S: **Irina V. Karakozova** — Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Head of the Department for the methodology of rules development in construction; **Moscow State Autonomous Institution Research analytical center (NIAZ)**; 27 1-st Brestskaya st., Moscow, 125047, Russian Federation; Associate professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 4750-3869, Scopus: 57190864252; i.kar@inbox.ru;

Alexander S. Pavlov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of the Department of Expertise and Optimization of Design Solutions; **All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation (VNIIAES)**; 25 Ferghanskaya st., Moscow, 109507, Russian Federation; RISC ID: 79850; a.s.pavlov@inbox.ru.