

Известия вузов. Строительство. 2023. № 2. С. 65–78.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2023; (2): 65–78.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 69.003:658.387

DOI: 10.32683/0536-1052-2023-770-2-65-78

**УРОВНИ ДЕКОМПОЗИЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ  
ЦИФРОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ (4D-МОДЕЛЕЙ)  
ДЛЯ ЗАДАЧ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**Сергей Иванович Пименов**

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ),  
Казань, Россия

**Аннотация.** В статье предложена структура уровней декомпозиции строительной цифровой информационной модели (4D-модель) на примере квартальной жилой застройки. В основу классификации уровней заложены принципы классификации строительных процессов и иерархии элементов модели. На каждом уровне декомпозиции принята минимальная условно неделимая единица, учитывающая уровень декомпозиции цифровой информационной модели объекта капитального строительства и уровень декомпозиции задач календарно-сетевого графика. Значимость для строительной отрасли состоит в расширении терминологической базы в части организационно-технологического моделирования строительного производства с применением технологий информационного моделирования, разработке структуры уровней декомпозиции 4D-моделей, обеспечивающих возможность формулирования основных требований к ее разработке.

**Ключевые слова:** строительная цифровая информационная модель, 4D-модель, календарно-сетевой график, уровни декомпозиции 4D-модели, адаптированные модели, организационно-технологическое моделирование строительного производства

**Для цитирования:** Пименов С.И. Уровни декомпозиции строительных цифровых информационных моделей (4D-моделей) для задач организационно-технологического моделирования строительного производства // Известия вузов. Строительство. 2023. № 2. С. 65–78. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-770-2-65-78.

Original article

**LEVELS OF DECOMPOSITION OF 4D MODELS FOR THE TASKS  
OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL MODELING  
OF CONSTRUCTION PRODUCTION**

**Sergey I. Pimenov**

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE), Kazan, Russia

**Abstract.** The structure of decomposition levels of 4D models has been formed on the example of quarter residential development. The classification of levels is based on the principles of classification of building processes and the hierarchy of model elements.

At each level of decomposition, a minimum conditionally indivisible unit is adopted, taking into account the level of decomposition of the digital information model of the capital construction object and the level of decomposition of the tasks of the schedule.

**Keywords:** construction digital information model, 4D model, schedule, decomposition levels of 4D models, adapted models, organizational and technological modeling of construction production

**For citation:** Pimenov S.I. Levels of decomposition of 4D models for the tasks of organizational and technological modeling of construction production. *News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2023; (2): 65–78. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2023-770-2-65-78.

**Введение.** Ввиду специфики градостроительной деятельности, включающей взаимодействие множества участников, наличие высокой информационной насыщенности и многократные изменения строительных проектов, в сочетании с цифровой трансформацией в отрасли, актуален пересмотр бизнес-модели на уровне отдельных организаций и в градостроительной сфере в целом. Одним из ключевых направлений развития цифровой экосистемы отрасли является разработка организационно-технологических моделей производственных процессов на основе технологии информационного моделирования (ТИМ) [1, 2].

Использование ТИМ стало ответом на необходимость обработки значительных объемов информации в процессе проектирования, строительства и эксплуатации объектов капитального строительства, а также на многократную корректировку данных в процессе реализации проекта [3]. Развитие информационных технологий и специализированных программных продуктов позволило создавать цифровые информационные модели объекта капитального строительства (ЦИМ ОКС), которые способны включать и накапливать с развитием проекта необходимые сведения о нем [4–7].

На каждом из основных этапов строительного проекта в вопросах планирования, выполнения и контроля деятельности участвуют представители разных сторон [8–10]. Сложность строительных проектов заключается в их быстром темпе [11] и уникальной среде [7, 12].

На первых этапах планирования строительного проекта инвестором, застройщиком, заказчиком создается план с учетом своих преследуемых целей. Этот план достаточно укрупненный и не детализирует каждую из задач строительного проекта, в том числе потому что имеется неопределенность в будущих изменениях, обстоятельствах, тем не менее ориентировочную продолжительность реализации проекта фиксирует. На следующем этапе при выборе исполнителя-проектировщика формируется задача создания проекта будущего объекта по концепции, который бы удовлетворял установленному бюджету и был реализован к назначенному сроку. Эти решения вносятся в раздел «Проект организации строительства» (ПОС). В нем задачи разбиваются на подзадачи, степень детализации плана увеличивается, что позволяет адекватней оценить первоначальный план.

В период подготовки к строительству исполнителем-подрядчиком создается следующий план – график производства работ в части проекта производства работ (ППР). Этот график, согласно СП 48.13330.2019, не должен отступать от плана ПОС, иначе требуется его пересогласование в системе

подрядчик–заказчик–проектировщик [8]. График производства работ, учитывающий конкретные ресурсы, логистику, реальную техническую оснащенность подрядной организации, становится планом еще большей детализации.

Таким образом, создаются условия, когда деятельность всех основных участников строительного проекта тесно взаимосвязана, и важным является сотрудничество на протяжении всего проекта с целью снижения количества и качества возможных отказов. Однако это не всегда достигается по ряду причин. Например, если установлены разные конечные цели участникам проекта (проектировщикам, подрядчикам), то в таких условиях система включает в себя несогласованные подсистемы [5], уникальность и изменчивость строительного проекта.

Эти основные причины отражаются в следующих факторах:

недостаточная коммуникация между проектировщиками–заказчиком–подрядчиками;

отсутствие возможности свободного общения и обмена информацией на всех этапах проекта;

недостаточная точность и детализация проектных решений, заложенных как в проектной, так и рабочей документации, которые приводят к расхождению проекта и фактических условий строительной площадки, в том числе объемов работ;

слабая координация различных подрядных организаций на строительной площадке;

некорректное планирование работ, вызванное отсутствием актуальных данных и условий на строительной площадке;

разобщенность раздела ПОС с рабочей документацией и ППР.

Проанализировав вышеперечисленные проблемы, можно утверждать, что необходимость в интеграции и координации задач проекта не вызывает сомнений. Трудно не согласиться с мнением авторов [13, 14], что взаимодействие участников проекта в режиме единой информационной среды более привлекательный и эффективный метод в сравнении с традиционными и затратными методами бумажного документооборота в строительстве. Интеграция ТИМ в комплексную систему управления строительным проектом является необходимым процессом для повышения эффективности организационно-технологической системы, как следствие, управления строительными проектами. Отечественная организационно-технологическая система в строительстве включает в себя набор документов и чертежей, которые должны обеспечивать работоспособность всей системы строительства, однако она эту функцию в полном объеме не выполняет.

Одним из путей повышения эффективности организационно-технологической системы может быть создание отдела визуального планирования (ситуационно-моделирующего центра), в состав которого должны войти представители основных участников проекта: заказчика, проектировщика, подрядчика, производителей материалов и оборудования и др. [15]. Основным инструментом ситуационно-моделирующего центра должна стать строительная цифровая информационная модель (СЦИМ) (4D-модель). Наличие цифровых инструментов и специализированного программного обес-

печения (ПО) для формирования СЦИМ (4D-модели) позволит интегрировать и синхронизировать применяемые в проекте графики, согласовывать принимаемые решения. Ситуационно-моделирующий центр должен выступать координатором стоящих в проекте задач, что даст возможность снизить информационную неопределенность, сократить уровень недопонимания в системе подрядчик–заказчик–проектировщик, выявить слабые стороны, увеличить прозрачность и эффективность реализации строительного проекта.

По мнению автора, путем принятия согласованных решений в ситуационно-моделирующем центре можно повысить эффективность организационно-технологической системы, а также оперативность принимаемых решений с помощью современных технологий и методов управления проектами. ЦИМ с применением ТИМ способны заменить большую часть как записей пояснительной записки, так и чертежей, сохранить важную информацию, значительно снижающую риски появления отказов в строительном производстве.

Первоочередной задачей для внедрения ЦИМ в управление строительством является определение требований к модели объекта, которая будет использоваться на этапе реализации проекта и обеспечивать интеграцию с процессом управления строительством [16]. Также необходимо установить порядок увязки календарно-сетевого графика (КСГ) в составе СЦИМ (4D-модели), учитывая их иерархический уровень. Это бы способствовало повышению качества управления сроками, уменьшению трудоемкости оценки продолжительности строительства, сокращению сроков рассмотрения и согласования проектных решений и оптимизированию процессов строительного контроля.

В работе [17] обобщенно оценено преимущество применения 4D-моделей и подходов работы с ними в строительной отрасли в сравнении с применением традиционных КСГ, которое составило 40 %. Объясняется это тем, что интеграция цифровой модели к календарно-сетевому графику строительства позволяет выявлять ошибки планирования [18], принимая во внимание тот факт, что 70 % созданных традиционных КСГ неправильные и неоптимизированные [19]. Отступление от оптимального плана задач КСГ оказывает прямое влияние на продолжительность и стоимость работ, а также проявление других побочных эффектов в виде снижения качества выполнения работ [20]. При выполнении работ по некорректному КСГ появляются отказы и нарушения в координации работ, строительным организациям приходится затрачивать дополнительные ресурсы и адаптироваться к меняющимся условиям в сжатые сроки.

СЦИМ (4D-модель) как один из важных элементов технологии информационного моделирования и одновременно организационно-технологической модели включает в себя цифровую информационную модель местности и цифровые информационные модели объектов капитального строительства, а также цифровые информационные модели временных зданий и сооружений, основных ведущих машин и механизмов, необходимых для реализации строительства и взаимосвязанных с ней КСГ [15], позволяет еще до стадии строительства критически оценить и подобрать рациональный сценарий реализации строительного проекта.

Уточнение и детализация процессов с использованием инструмента СЦИМ (4D-модели) дает возможность основным участникам строительного проекта иметь хорошее понимание и четкое представление о задачах, которые необходимо выполнить. Чем детальнее объясняется процесс строительного производства, тем больше вероятность достижения первоначальных целей проекта [21].

Использование СЦИМ (4D-моделей) и среды общих данных позволит повысить эффективность коммуникаций между основными участниками строительного проекта, полностью заменить графические материалы ПОС и ППР, как следствие, будет способствовать совершенствованию организационно-технологической системы в строительстве [15]. Объясняется это и тем, что СЦИМ является динамической моделью, способной отображать простые и комплексные строительные процессы, основные этапы. При ее ведении можно имитировать развитие реального строительного объекта во времени и анализировать его актуальное состояние в любой момент времени.

В условиях строительной площадки как сложной динамической системы [22] с целью повышения эффективности функций планирования и управления ресурсами необходимость в применении динамических моделей, например, СЦИМ (4D-моделей), по мнению автора, не вызывает сомнений, но имеются сложности для их реализации [15]. Несмотря на явные преимущества СЦИМ (4D-моделей), примеры ее применения в реальных проектах до сих пор скромны [21].

Говоря о СЦИМ (4D-моделях), нужно понимать и о какой степени детализации идет речь. Например, в работах [23, 24] предлагается использование 4D-модели, сформированной с детализацией до отдельных рабочих процессов, которые требуют высокого уровня компетенций в использовании современных инструментов, программных комплексов и глубоких знаний в технологии и организации строительства.

Трудности, которые приходилось видеть на практике [21], связаны и с выбором неподходящего программного обеспечения. Некоторые ПО позволяют лишь создавать простые 4D-модели из 3D-моделей, отображающие укрупненно отдельные этапы строительства, не дающие реальной картины строительной площадки, на основании которых становится невозможно адекватно производить планирование и управление ресурсами, однако не исключается, что им можно найти применение на верхних уровнях управления. Другой случай с применением более совершенных ПО, которые могут удовлетворить реальным задачам и целям планирования и управления ресурсами путем создания моделей повышенной детализации, но такие модели требуют трудоемкого процесса их создания. Таким образом, выбор требуемой детализации СЦИМ (4D-модели) должен быть оправдан, рационален. К формированию СЦИМ (4D-модели) должен быть разработан определенный подход, который бы обеспечивал его максимальную функциональность с минимальными дополнительными усилиями, затрачиваемыми на передачу информации.

При формировании 4D-модели и детализации ее процессов обнаруживаются проблемы с выгрузкой необходимой информации и отчетов для разных

уровней управления, которые связаны с увеличением сложности ее формирования и неопределенностью детализации задач КСГ, так как на уровнях детализации нет определенных требований, стандартов [25]. В работе [21] выдвинуто предложение со следующим планом действий: необходимо сформулировать цели 4D-моделирования → определить требования к получаемой информации от 4D-модели → разработать КСГ, адаптированный к использованию в 4D-модели → контролировать процесс создания 3D-модели, адаптированной к 4D-моделированию.

Следуя логике, формированию СЦИМ (4D-модели) должна предшествовать разработка как адаптированной 3D-модели, так и адаптированного КСГ. Важно, чтобы исходные отдельные файлы в виде ЦИМ и КСГ были созданы по определенным правилам, обеспечивающим дальнейшую «безболезненную» разработку СЦИМ (4D-модели) [26]. Для этого заблаговременно разработчикам ЦИМ (3D-модели) и КСГ должны быть представлены подробные указания правил моделирования, соответствующие обоснования структурирования и декомпозиции модели, критерии выбора ПО, информация о том, как будет связываться ЦИМ с КСГ [16]. Несоблюдение базовых принципов может привести к постоянным корректировкам в будущем, в процессе строительства, что будет плохим сценарием развития событий для всех сторон. С нарушением подобных правил можно сформировать СЦИМ (4D-модель), однако она потребует постоянного внимания в корректировках, затрат времени, станет малоэффективной и не сможет оправдать всех ожиданий участников строительного проекта.

Ввиду недостаточных коммуникаций между проектировщиками и подрядчиками при определении требований к ЦИМ предоставляется неполная информация для заинтересованных сотрудников строительного проекта [26]. Также в работе [25] выдвинуто предложение об изменении порядка заключения контрактов с исполнителями, заключающееся в том, что 3D-модель должна разрабатываться после представления требований к 4D-модели. В формирование 3D-модели, включая обоснование требований к спецификации (Levels of Detail (LOD)) элементов модели, перечень атрибутов, дополнительную информацию и т.д., должны быть подключены заинтересованные участники строительного проекта [27].

Таким образом, при уточнении плана реализации строительного проекта необходимо иметь четкое представление о целях и задачах формирования СЦИМ (4D-модели). И одной из задач в достижении цели является определение ее детализации.

Описания требований к детализации СЦИМ (4D-модели) в стандартах, нормативной и научной литературе отсутствуют. По мнению автора, с целью реализации строительного проекта с применением ТИМ такие требования должны быть определены, сформулированы и отражены в плане реализации проекта. Поэтому предложена классификация уровней декомпозиции СЦИМ (4D-моделей), которые могут быть применены для описания требований.

Цель работы – создание структуры уровней декомпозиции СЦИМ (4D-моделей) с описанием требований к их формированию.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:  
анализ применяемых СЦИМ (4D-моделей) и функциональных возможностей ПО для их формирования;  
формулирование отличительных параметров СЦИМ (4D-моделей);  
систематизация и классификация уровней декомпозиции СЦИМ (4D-моделей).

**Результаты и обсуждение.** На основе структуры декомпозиции элементов ЦИМ ОКС (3D-модели) следует выработать структуру декомпозиции работ КСГ с детализацией до необходимого нижнего уровня в зависимости от участника и задач создания СЦИМ (4D-модели). Путем связывания работ КСГ с элементами ЦИМ ОКС формируется СЦИМ (4D-модель) [7]. Таким образом, в сравнении со статической проектной ЦИМ ОКС, СЦИМ (4D-модель) является динамической моделью.

Для описания требований к уровню декомпозиции элементов проектной ЦИМ ОКС (3D-модели) в практике уже распространены требования к уровню детализации (проработки) элементов моделей, так называемые уровни проработки (LOD), находящиеся в интервале от LOD100 до LOD500. В части геометрии LOD задает, насколько модель должна соответствовать объекту в реальном мире. Чем выше цифра, тем детальней и реальней должна быть модель.

По аналогии с классификацией проектной ЦИМ классификацию уровней декомпозиции СЦИМ (4D-модели) следует формировать из соображений адекватности отображения с учетом визуализации строительных процессов. Чем выше задан уровень, тем реалистичней должна быть модель. Помимо геометрических параметров ЦИМ классификация по уровням декомпозиции СЦИМ предусматривает ее динамичность, иначе говоря, насколько детально отображаются строительные процессы. Следовательно, для классификации уровней декомпозиции СЦИМ учитываются уже два параметра: уровень декомпозиции ЦИМ и уровень декомпозиции задач КСГ.

С учетом вышеизложенного, автором предлагается новый термин с определением: уровень декомпозиции СЦИМ (4D-модели) – набор требований, учитывающий уровень декомпозиции ЦИМ ОКС и КСГ. Уровень декомпозиции СЦИМ (4D-модели) задает минимальную единицу декомпозиции ЦИМ ОКС (часть элемента, элемент, группа элементов, захватка, этаж, этап, узел) и минимальную единицу декомпозиции задач КСГ (простой рабочий процесс, комплексный рабочий процесс, этап строительства), а также ее динамические особенности.

На каждом уровне декомпозиции СЦИМ принята минимальная условно неделимая единица, учитывающая уровень декомпозиции ЦИМ ОКС и уровень декомпозиции задач КСГ. Представлено математическое описание единицы декомпозиции СЦИМ:  $f(c, t) = kct$ , где  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $c$  – единица декомпозиции ЦИМ ОКС,  $t$  – единица декомпозиции задач КСГ. Величина единицы декомпозиции СЦИМ прямо пропорциональна единице декомпозиции ЦИМ и единице декомпозиции задач КСГ: тем выше, чем выше составляющие параметры.

С учетом известной классификации строительных процессов и иерархического принципа деления элементов ЦИМ ОКС сформирована таблица уровней декомпозиции СЦИМ (на примере квартальной жилой застройки),

**Уровни декомпозиции СЦИМ (4D-моделей) их параметры (на примере квартальной жилой застройки)**

**Decomposition levels of 4D models and their parameters (on the example of residential quarters)**

Уровень декомпозиции СЦИМ	Уровень декомпозиции СЦИМ	Нижний уровень декомпозиции		Динамичные особенности СЦИМ
		ЦИМ ОКС	задач КСГ	
1	Низкий	Часть здания, связанная с этапом строительства	Этап строительства объекта	Модели техники, оборудования статичны. Появление частей здания ЦИМ ОКС соответствует выбранному методу организации строительства
2	→→→	То же	То же	Модели техники, оборудования статичны. Появление частей здания ЦИМ ОКС соответствует направлению возведения объекта (поэтапно)
3	Средний	Группа одно- и разнотипных конструктивных элементов в пределах захватки, этажа	Комплексный рабочий процесс	Модели техники, оборудования статичны. Появление групп конструктивных элементов ЦИМ ОКС соответствует технологии их возведения, по захваткам, этажам
4	→→→	Группа однотипных конструктивных элементов в пределах захватки	То же	Модели техники, оборудования должны перемещаться по стоянкам. Перемещение элементов грузов может быть показано / не показано. Появление групп однотипных конструктивных элементов ЦИМ ОКС в проектном положении соответствует технологии, по захваткам
5	Высокий	Конструктивный элемент	Простой рабочий процесс	Анимированное движение моделей техники, оборудования. Перемещение элементов грузов может быть показано с учетом технологии их подачи. Направление появления элементов ЦИМ ОКС в проектном положении соответствует технологии
6	Очень высокий	Часть конструктивного элемента	То же	Анимированное движение моделей техники, оборудования. Перемещение элементов грузов показано с учетом технологии их подачи. Появления частей элементов ЦИМ ОКС в проектном положении соответствует заданной технологии с добавлением моделей монтажной оснастки

которая может применяться в системе организационно-технологического моделирования строительного производства с развитием ТИМ.

От требуемого уровня декомпозиции СЦИМ зависит сложность ее формирования, которая связана с необходимым уровнем компетенций сотрудника работы со специализированным ПО и уровнем знаний в области технологии и организации строительства. Стоит добавить, что не все имеющиеся на рынке ПО, заявляемые как инструмент для формирования СЦИМ (4D-модели), позволяют разрабатывать любой уровень декомпозиции. Некоторые из них ограничены в функциональных возможностях [6, 21]. Поэтому в зависимости от целей формирования СЦИМ (4D-модели) следует обосновано подходить к выбору ПО.

Элементы ЦИМ ОКС в ПО структурированы зачастую по иерархическому принципу (этаж → помещение на этаже → дверь в помещении). Помимо того, что можно отдельно выбрать каждый элемент ЦИМ, при формировании СЦИМ уровней 1–4 появляется необходимость выбора нескольких элементов. Для этого удобнее объединять несколько элементов ЦИМ в группы, в том числе по признаку принадлежности, по общему признаку (например, все колонны на этаже / все кирпичные стены / элементы в пределах захватки и т.д.).

Порядок формирования СЦИМ необходимого уровня декомпозиции зависит от исходной детализации ЦИМ и детализации задач КСГ. Стоит добавить, что ТИМ не предусматривает развитие лишь одной цифровой модели на каждом из этапов жизненного цикла, информационное моделирование можно осуществлять потоками [28], специализированных ЦИМ требуется больше, чем основных этапов. Кроме того, на разных уровнях планирования и управления одинаковая степень декомпозиции СЦИМ не требуется. Поэтому и для разных уровней декомпозиции СЦИМ может использоваться различная ЦИМ, отличающаяся набором атрибутов и уровнем проработки, но относящаяся к одному объекту строительства.

Для формирования СЦИМ 1-го или 2-го уровней не обязательна проработанная сводная цифровая модель объекта, достаточно промежуточной (рабочей) модели. Вместе с этим из сводной цифровой модели объекта также возможно получить СЦИМ любого из 6 уровней. Чтобы получить необходимый нижний уровень декомпозиции ЦИМ для формирования СЦИМ, в одном случае (для 1, 2, 3 или 4-го уровней) потребуется объединить отдельные элементы ЦИМ в группы, в другом случае (для 5-го или 6-го уровней) – разбить элементы ЦИМ на делянки, захватки с учетом особенностей строительного производства.

С развитием цифровой трансформации технологии информационного моделирования позволяют связать уровни декомпозиции СЦИМ (4D-модели). И связь между ними не обязательно выполнять через элементы ЦИМ ОКС, будет достаточно связать уровни через вехи задач КСГ, применяя специализированные ПО и платформы многоуровневого планирования и управления [29]. Такой сценарий работы выглядит более реалистичным, чем использование одной ЦИМ на всех уровнях. Система организационно-технологического моделирования в технологии информационного моделирования станет сквозной, позволит обеспечить поддержание актуальности информации (сроков, ресурсов), оперативность получения достаточной информации для

каждого уровня планирования и управления, что представляет особую ценность при реализации сложных строительных проектов.

**Выводы.** 1. Предложен способ повышения эффективности организационно-технологической системы в строительстве, заключающийся в создании отдела визуального планирования (ситуационно-моделирующего центра), в состав которого должны войти представители основных участников проекта: инвестора, заказчика, проектировщика, подрядчика, производителей материалов и оборудования и др. Одним из основным инструментом ситуационно-моделирующего центра должна стать СЦИМ (4D-модель). Наличие цифровых инструментов и специализированного программного обеспечения позволит интегрировать и синхронизировать применяемые в проекте графики, а присутствие представителей основных участников – повысить эффективность координации работы участников строительного проекта.

2. Установлено, что формированию СЦИМ (4D-модели) должна предшествовать разработка адаптированной ЦИМ ОКС и адаптированного КСГ. С целью сохранения принципа преемственности в технологии информационного моделирования и переходе строительного проекта до стадии строительства при разработке проектной ЦИМ ОКС должны учитываться особенности формирования СЦИМ (4D-модели). Для этого сотрудникам проектной организации, формирующих проектную ЦИМ ОКС, необходимо довести обоснования правил структурирования и декомпозиции ЦИМ, критерии выбора ПО, информацию о том, как будет далее связываться ЦИМ ОКС с КСГ. Несоблюдение базовых принципов может привести к постоянным корректировкам в будущем, в процессе строительства и актуализации СЦИМ (4D-модели), что является наихудшим сценарием развития событий для всех заинтересованных участников.

3. Предложен новый термин – уровень декомпозиции СЦИМ (4D-модели), который задает минимальную единицу декомпозиции ЦИМ ОКС (часть элемента, элемент, группа элементов, захватка, этаж, этап) и минимальную единицу декомпозиции задач КСГ (простой рабочий процесс, комплексный рабочий процесс, этап строительства), а также ее динамические особенности. Представлено математическое описание единицы декомпозиции СЦИМ.

4. На примере квартальной жилой застройки сформирована структура уровней декомпозиции СЦИМ (4D-моделей), включающая 6 уровней. В основу классификации уровней заложены принципы классификации строительных процессов и иерархии элементов ЦИМ ОКС. На каждом уровне декомпозиции принята минимальная условно неделимая единица, учитывающая уровень декомпозиции ЦИМ ОКС и уровень декомпозиции задач КСГ.

### **Список источников**

1. Савина А.Г., Малавкина Л.И., Савин Д.А. Теоретико-методологические основы построения цифровой инфраструктуры управления объектами капитального строительства на базе BIM // Russian Journal of Economics and Law. 2023. Т. 17, № 1. С. 90–109.
2. Савина А.Г., Малавкина Л.И., Савин Д.А. Информационно-технологическое обеспечение формирования единой цифровой среды взаимодействия в градостроительной сфере // Образование и наука без границ: фундаментальные и прикладные исследования. 2022. № 15. С. 60–65.

3. Гущина Ю.В., Николенко Н.С. Современные аспекты использования BIM-технологий в управлении строительными проектами // Лучшая научно-инновационная работа 2019. Сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса. МЦНП «Новая наука». Петрозаводск, 2019. С. 44–47.
4. Гусакова Е.А. Информационное моделирование жизненного цикла проектов высотного строительства // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13, № 1. С. 14–22.
5. Гинзбург А.В. Информационная модель жизненного цикла строительного объекта // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 9. С. 61–65.
6. Пименов С.И. Анализ современных программных комплексов для виртуального строительства (4D-моделирования) // Научный журнал строительства и архитектуры. 2022. № 3. С. 92–104.
7. Болотин С.А. Формирование графика комплексной застройки территории с использованием Revit и Microsoft Project // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: Материалы II Междунар. научн.-практ. конф. СПб., 2019. С. 53–58.
8. Коклюгина Л.А., Коклюгин А.В. К вопросу о разработке организационно-технической документации // Известия КГАСУ. 2009. № 1. С. 318–321.
9. Медяник Ю.В., Хафизов Р.Р. Инжиниринг в строительстве // Известия КГАСУ. 2020. № 1. С. 172–180.
10. Мухаметрахимов Р.Х., Зиганишина Л.В. Технология и контроль качества строительной 3D-печати // Известия КГАСУ. 2022. № 1. С. 64–79.
11. Heaton J., Parlidak A.K., Schooling J. Design and development of BIM models to support operations and maintenance // Comput. Ind. 2019. No. 111. P. 172–186.
12. Guerra B.C., Leite F., Faust K.M. 4D-BIM to enhance construction waste reuse and recycle planning: Case studies on concrete and drywall waste streams // Waste Manag. 2020. No. 116. P. 79–90.
13. Дмитриев А.Н., Владимирова И.Л. Технологии информационного моделирования в управлении строительными проектами России // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 10. С. 48–59.
14. Матвеева М.В., Первоченков В.В. Некоторые аспекты организации производственных процессов на этапе строительства жизненного цикла объекта капитального строительства (на примере здания с металлическими конструкциями) // Известия вузов. Строительство. 2021. № 12. С. 99–109.
15. Пименов С.И. Строительная информационная модель // Construction and Geotechnics. 2022. Т. 13, № 3. С. 72–84.
16. Алексанин А.В., Жаров Я.В. Потенциал использования цифровых информационных моделей в рамках управления строительством // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 1. С. 52–55.
17. Candelario-Garrido A., García-Sanz-Calcedo J., Reyes Rodríguez A.M. A quantitative analysis on the feasibility of 4D planning graphic systems versus conventional systems in building projects // Sustain. Cities Soc. 2017. No. 35. P. 378–384.
18. Mahalingam A., Kashyap R., Mahajan C. An evaluation of the applicability of 4D CAD on construction projects // Autom. Constr. 2010. No. 19. P. 148–159.
19. Tan Y., Fang Y., Zhou T., Gan V.J.L., Cheng J.C.P. BIM supported 4D acoustics simulation approach to mitigating noise impact on maintenance workers on offshore oil and gas platforms // Autom. Constr. 2019. Vol. 100. P. 1–10.
20. Gebrehiwet T., Luo H. Analysis of delay impact on construction project based on RII and correlation coefficient: Empirical study // Procedia Eng. 2017. No. 196. P. 366–374.
21. Doukari O., Seck B., Greenwood D. The creation of construction schedules in 4D BIM: A comparison of conventional and automated approaches // Buildings. 2022. Vol. 12. P. 1145.

22. Гусаков А.А. Системотехника и новые направления строительной науки // Промышленное и гражданское строительство. 2005. № 1. С. 82–83.
23. Zhou Y., Ding L., Wang X., Truijens M., Luo H. Applicability of 4D modeling for resource allocation in mega liquefied natural gas plant construction // Autom. Constr. 2015. Vol. 50. P. 50–63.
24. Кабанов В.Н. Принципы построения информационной модели отдельного строительного процесса // Известия вузов. Строительство. 2022. № 10. С. 64–75.
25. Kolarić S., Vukomanović M., Ramljak A. Analyzing the level of detail of construction schedule for enabling site logistics planning (SLP) in the building information modeling (BIM) environment // Sustainability. 2022. Vol. 14. P. 6701.
26. Guerra B.C., Leite F. Bridging the gap between engineering and construction 3D models in support of advanced work packaging // J. Leg. Aff. Disput. Resolut. Eng. Constr. 2020. Vol. 12. P. 04520029.
27. Mäki T., Kerosuo H. Site managers' daily work and the uses of building information modelling in construction site management // Constr. Manag. Econ. 2015. Vol. 33. P. 163–175.
28. Гусакова Е.А., Овчинников А.Н. Перспективы моделирования жизненного цикла объекта капитального строительства информационными потоками // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15, № 8. С. 1191–1200.
29. Пименов С.И. Состояние и перспективы многоуровневой системы планирования строительных проектов в условиях цифровой трансформации // Construction and Geotechnics. 2022. Т. 13, № 2. С. 55–66.

## References

1. Savina A.G., Malyavkina L.I., Savin D.A. Theoretical and methodological foundations for building a digital infrastructure for managing capital construction projects based on BIM. *Russian Journal of Economics and Law*. 2023; 17(1): 90–109. (In Russ.).
2. Savina A.G., Malyavkina L.I., Savin D.A. Information and technological support for the formation of a unified digital environment for interaction in the urban planning sphere. *Obrazovaniye i nauka bez granits: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya = Education and Science without Borders: Fundamental and Applied Research*. 2022; (15): 60–65. (In Russ.).
3. Gushchina Yu.V., Nikolenko N.S. Modern aspects of the use of BIM technologies in construction project management. The best scientific and innovative work 2019. Collection of articles of the International Research Competition. MCNP "New Science". Petrozavodsk, 2019. P. 44–47. (In Russ.).
4. Gusakova E.A. Information modeling of life cycle of high-rise construction projects. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(1): 14–22. (In Russ.).
5. Ginzburg A.V. Information model of the life cycle of a construction object. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo = Industrial and civil construction*. 2016; (9): 61–65. (In Russ.).
6. Pimenov S.I. Analysis of modern software complexes for virtual construction (4D modeling). *Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arkhitektury = Scientific Journal of Construction and Architecture*. 2022; (3): 92–104. (In Russ.).
7. Bolotin S.A. Scheduling of complex development using Revit and Microsoft Project. BIM-modeling in the tasks of construction and architecture: Materials of the II International scientific-practical conference. St. Petersburg, 2019. P. 53–58. (In Russ.).
8. Kokliugina L.A., Kokliugin A.V. To the question of the development of organizational and technological documentation. *Izvestiya KGASU = News Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2009; 1 (11): 318–321. (In Russ.).

9. Medyanik Yu.V., Khafizov R.R. Engineering in construction. *Izvestiya KGASU = News Kazan State University of Architecture and Engineering.* 2020; (1): 172–180. (In Russ.).
10. Mukhametrakhimov R.Kh., Ziganshina L.V. Technology and quality control of 3DCP. *Izvestiya KGASU = News Kazan State University of Architecture and Engineering.* 2022; (1): 64–79. (In Russ.).
11. Heaton J., Parlikad A.K., Schooling J. Design and development of BIM models to support operations and maintenance. *Comput. Ind.* 2019; (111): 172–186.
12. Guerra B.C., Leite F., Faust K.M. 4D-BIM to enhance construction waste reuse and recycle planning: Case studies on concrete and drywall waste streams. *Waste Manag.* 2020; (116): 79–90.
13. Dmitriev A.N., Vladimirova I.L. BIM technologies in building construction projects management in Russia. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo = Industrial and civil construction.* 2019; (10): 48–59. (In Russ.).
14. Matveeva M.V., Pervozenkov V.V. Some aspects of the organization of production processes at the stage of construction of the life cycle of a capital construction object (on the example of a building with metal structures). *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2021; (12): 99–109. (In Russ.).
15. Pimenov S.I. Construction information model. *Construction and Geotechnics.* 2022; 13 (3): 72–84. (In Russ.).
16. Aleksanin A.V., Zharov Ya.V. The potential of using digital information models in the framework of construction management. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo = Industrial and civil construction.* 2022; (1): 52–55. (In Russ.).
17. Candelario-Garrido A., García-Sanz-Calcedo J., Reyes Rodríguez A.M. A quantitative analysis on the feasibility of 4D planning graphic systems versus conventional systems in building projects. *Sustain. Cities Soc.* 2017; (35): 378–384.
18. Mahalingam A., Kashyap R., Mahajan C. An evaluation of the applicability of 4D CAD on construction projects. *Autom. Constr.* 2010; (19): 148–159.
19. Tan Y., Fang Y., Zhou T., Gan V.J.L., Cheng J.C.P. BIM supported 4D acoustics simulation approach to mitigating noise impact on maintenance workers on offshore oil and gas platforms. *Autom. Constr.* 2019; (100): 1–10.
20. Gebrehiwet T., Luo H. Analysis of delay impact on construction project based on RII and correlation coefficient: Empirical study. *Procedia Eng.* 2017; (196): 366–374.
21. Doukari O., Seck B., Greenwood D. The creation of construction schedules in 4D BIM: A comparison of conventional and automated approaches. *Buildings.* 2022; (12): 1145.
22. Gusakov A.A. System engineering and new directions of construction science. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo = Industrial and civil construction.* 2005; (1): 82–83. (In Russ.).
23. Zhou Y., Ding L., Wang X., Truijens M., Luo H. Applicability of 4D modeling for resource allocation in mega liquefied natural gas plant construction. *Autom. Constr.* 2015; (50): 50–63.
24. Kabanov V.N. Principles of building an information model of a separate construction process. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2022; (10): 64–75. (In Russ.).
25. Kolarić S., Vukomanović M., Ramljak A. Analyzing the level of detail of construction schedule for enabling site logistics planning (SLP) in the building information modeling (BIM) environment. *Sustainability.* 2022; (14): 6701.
26. Guerra B.C., Leite F. Bridging the gap between engineering and construction 3D models in support of advanced work packaging. *J. Leg. Aff. Disput. Resolut. Eng. Constr.* 2020; (12): 04520029.

27. Mäki T., Kerosuo H. Site managers' daily work and the uses of building information modelling in construction site management. *Constr. Manag. Econ.* 2015; (33): 163–175.
28. Gusakova E.A., Ovchinnikov A.N. Prospects for the life cycle modeling of a capital construction facility using information flows. *Vestnik MGSU.* 2020; 15 (8): 1191–1200. (In Russ.).
29. Pimenov S.I. The state and prospects of a multi-level planning system for construction projects in the context of digital transformation. *Construction and Geotechnics.* 2022; 13 (2): 55–66. (In Russ.).

**Информация об авторе**

**С.И. Пименов** – кандидат технических наук, доцент, sergeypimenov12@yandex.ru

**Information about the author**

**S.I. Pimenov** – PhD, Ass. Professor, sergeypimenov12@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 27.12.2022

The article was submitted 27.12.2022

Одобрена после рецензирования 27.01.2023

Approved after reviewing 27.01.2023

Принята к публикации 03.02.2023

Accepted for publication 03.02.2023

---