

Управление жизненным циклом объекта капитального строительства с минимизацией загрязнения атмосферного воздуха

Валерий Николаевич Азаров, Олег Васильевич Бурлаченко, Александр Олегович Бурлаченко, Мария Денисовна Азарова

Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ); г. Волгоград, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Существующие подходы к принятию управленческих решений в строительном производстве позволяют выбирать варианты лишь для определенного этапа жизненного цикла объекта капитального строительства (ЖЦ ОКС) без учета их эффективности на протяжении всего ЖЦ. Для устранения этого недостатка предлагается система информационного обеспечения управления ЖЦ ОКС с учетом минимизации пылевого загрязнения атмосферного воздуха при реализации принятых решений.

Материалы и методы. В рамках системного подхода к управлению ЖЦ ОКС важнейшее значение имеет правильный выбор критериев, с использованием которых может быть принято оптимальное решение. Необходимость обеспечения эффективности управленческих решений на протяжении ЖЦ ОКС предполагает разработку системы, позволяющей уже на начальных этапах прогнозировать поведение управляемого объекта. Поскольку наступление различных событий (ситуаций) в процессе ЖЦ ОКС носит случайный характер, большое значение имеет определение вероятности наступления тех или иных событий. Представлены технические средства для мониторинга загрязнения атмосферного воздуха пылевыми частицами $PM_{2,5}$ и PM_{10} .

Результаты. Для учета иных критериев принятия решений, помимо технико-экономических показателей, предложены полученные экспериментальным путем значения концентрации пыли в атмосферном воздухе. С этой целью систематизированы источники такого загрязнения на всех этапах ЖЦ ОКС. На основе построенной модели ЖЦ получены выражения для определения вероятности наступления событий на протяжении ЖЦ ОКС. Данная стохастическая модель дает возможность прогнозировать состояние объекта управления при реализации того или иного решения.

Выводы. Построена система информационного обеспечения, позволяющая, в отличие от применяемых методик, принимать решения по управлению ЖЦ ОКС не только с учетом технико-экономической эффективности сравниваемых вариантов, но и степени пылевого загрязнения атмосферного воздуха. С помощью разработанного информационного обеспечения можно учитывать случайный характер наступления тех или иных событий в течение ЖЦ ОКС с установлением вероятности их наступления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: управление жизненным циклом, пылевое загрязнение, мелкодисперсная пыль, объект капитального строительства, критерии выбора, измерители концентрации пыли, эффективность управленческих решений

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Азаров В.Н., Бурлаченко О.В., Бурлаченко А.О., Азарова М.Д. Управление жизненным циклом объекта капитального строительства с минимизацией загрязнения атмосферного воздуха // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 3. С. 456–468. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.456-468

Автор, ответственный за переписку: Олег Васильевич Бурлаченко, oburlachenko@yandex.ru.

Life cycle management of capital construction object with minimization of atmospheric air pollution

Valerii N. Azarov, Oleg V. Burlachenko, Alexander O. Burlachenko, Maria D. Azarova

Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The existing approaches to management decision-making in construction production give the opportunity to select options only for a certain stage of the capital construction object life cycle (LC CCO), not considering their effectiveness throughout the whole LC. To eliminate this disadvantage, the authors propose a system of information support for the LC CCO management, taking into account the minimization of atmospheric air dust pollution during the implementation of decisions.

Materials and methods. Within the framework of a systematic approach to the LC CCO management, the correct criteria choice is of crucial importance, using which an optimal decision can be made. On the other hand, the need to ensure the effectiveness of managerial decisions throughout the LC CCO involves the development of a system that allows to predict

the managed object behavior throughout its entire life cycle already in the initial stages. Since the occurrence of various events (situations) during the LC CCO is random, the determination of the probability of occurrence of these or those events is of great importance. Technical means for monitoring atmospheric air pollution by dust particles $PM_{2.5}$ and PM_{10} are presented.

Results. To take into account other decision-making criteria, besides technical and economic indicators, the experimentally obtained reduced values of dust concentration in atmospheric air are proposed. For this purpose, the sources of such pollution in all the LC CCO stages are systematized. Based on the developed life cycle model, expressions for determining the probability of events occurrence during the LC CCO are obtained. This stochastic model allows you to predict the state of the control object when implementing a particular solution.

The application of the proposed methodology made it possible to determine the fine dust concentration and the probability of exceeding the maximum permissible concentration in some types of work to calculate the effectiveness of the considered management decisions.

Conclusions. An information support system was built, which, unlike the applied methods, makes it possible to make decisions on the LC CCO management, not only taking into account the technical and economic efficiency of the compared options, but also the degree of atmospheric air dust pollution. In addition, the developed information support allows you to take into account the fact that certain events occurrence is random during the LC CCO with the determination of their occurrence probability.

KEYWORDS: life cycle management, dust pollution, fine dust, capital construction object, selection criteria, dust concentration meters, management decisions effectiveness

FOR CITATION: Azarov V.N., Burlachenko O.V., Burlachenko A.O., Azarova M.D. Life cycle management of capital construction object with minimization of atmospheric air pollution. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(3):456–468. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.456-468 (rus.).

Corresponding author: Oleg V. Burlachenko, oburlachenko@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В строительной сфере высокий уровень и качество управленческой деятельности является особенно сложной задачей, поскольку процесс управления представляет собой многозвенную, продолжающуюся десятки и сотни лет цепь не всегда последовательных событий, этапов жизненного цикла (ЖЦ), предполагающих необходимость сложных стохастических подходов к созданию методологии управления.

В этой связи важен правильный выбор критериев оптимизации, варьируя которые можно вырабатывать наиболее эффективное управленческое решение.

Существующие подходы к принятию управленческих решений в строительном производстве позволяют производить выбор технологий, вариантов конструктивного исполнения, средств механизации и т.д. лишь для какого-либо определенного этапа ЖЦ объекта капитального строительства (ОКС), без учета их эффективности на всем его протяжении. Современные требования к качеству строительной продукции могут быть удовлетворены только при реализации системного подхода к инвестиционно-строительному процессу как к управлению ОКС на протяжении всего его ЖЦ. Существует ряд подходов к декомпозиции ЖЦ ОКС на этапы.

Так, уже в 2000-е годы нынешнего столетия были разработаны основы системного подхода к строительному производству в концепции комплекса взаимосвязей между участниками инвестиционно-строительного проекта с различными этапами его ЖЦ [1]. При этом декомпозиция ЖЦ на этапы включает в себя цепочку от вхождения в проект до эксплуатации объекта, но, например, этапы демонтажа и утилизации объекта в предлагаемой модели не рассматривались.

Следующим этапом в развитии системотехнических подходов к строительному производству стала концепция непрерывной информационной поддержки ЖЦ строительного объекта (СО), предложенная в работе [2]. Авторы устраняют «разрыв» в информационном обеспечении между различными этапами ЖЦ ОКС. При этом не исследуются критерии выбора управленческих решений на протяжении ЖЦ, а также не устанавливаются функциональные зависимости, выявляющие эффективность принятых решений на различных его этапах. Между тем введение в модель поддержки ЖЦ подобных управляемых факторов позволит принимать управленческое решение, реализация которого даст возможность получить оптимальный результат на всех этапах ЖЦ ОКС, а не только для отдельно взятого этапа (как правило, этапа строительства).

В публикации [3] изучается структура ЖЦ стационарного и мобильного СО. Выявлены функциональные связи этапов ЖЦ, предполагающие внесение корректировок при принятии управленческих решений. Для повышения эффективности и адекватности таких решений необходимо построение модели ЖЦ ОКС с возможностью определения вероятности наступления того или иного события, в котором в информационном поле может быть ОКС. В концепции информационного обеспечения управления (ИОУ) ЖЦ событиями будем называть этапы ЖЦ, а также состояния объекта, в которых он может находиться в каком-либо из этапов (например, реконструкция в этапе эксплуатации ОКС).

Такой подход рассмотрен в трудах [4–8]. Авторы предложили модель ЖЦ ОКС в виде графа переходов. Наступление событий (этапов ЖЦ СО) носит стохастический характер. Была представлена модель, позволяющая определять вероятность

наступления того или иного события (пребывания объекта управления в информационной среде в том или ином состоянии, этапе ЖЦ).

В данной статье авторы развивают модель ЖЦ ОКС с учетом минимизации загрязнения атмосферного воздуха мелкодисперсной пылью, выделяемой на протяжении различных его этапов.

Выбор в качестве одного из критериев при принятии решений по управлению ЖЦ ОКС обусловлен негативным влиянием пылевого воздействия на здоровье не только рабочих, выполняющих строительные и ремонтные работы, но и людей, проживающих в зданиях, работающих в помещениях на протяжении эксплуатации объекта, а также в течение всего ЖЦ.

Проанализированы негативное влияние пылевого загрязнения на здоровье человека (особенно мелкодисперсной пыли), а также зависимость концентрации PM_{10} и $PM_{2,5}$ (частиц менее 10 и 2,5 мкм соответственно) рядом с местами проведения различных работ от природно-климатических условий, видов работ, характеристик урбанизированных территорий [9–17]. Представляет интерес изучение вопросов оценки пылевого загрязнения атмосферного воздуха на протяжении всех этапов ЖЦ ОКС с целью интеграции этих данных в общую систему ИОУ им.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью формирования системы информационного обеспечения управления ЖЦ ОКС с условием минимизации пылевого загрязнения атмосферного

воздуха авторы провели анализ источников такого загрязнения с выявлением этапов ЖЦ (событий в информационной среде), наиболее негативно влияющих на здоровье человека и окружающую среду. Результаты анализа приведены в табл. 1.

Табл. 1 позволяет выявить этапы ЖЦ (события), наиболее негативно влияющие на здоровье человека и окружающую среду. Проведены сбор и передача информации, а также расчет концентрации мелкодисперсной пыли в зонах выполнения работ, характерных для рассматриваемых событий по методике МРР-2017 с применением универсальной программы «Эколог», которая позволяет рассчитывать загрязнение атмосферного воздуха. Сформирована база данных в рамках информационного обеспечения принятия решений управления ЖЦ ОКС с минимизацией загрязнения атмосферного воздуха. Разработано техническое решение снижения концентрации пыли в атмосферном воздухе для конкретных видов работ¹.

За основу системы информационного обеспечения авторами принята модернизированная модель ЖЦ ОКС. Предложена модель ЖЦ в виде графа переходов [4–6]. Прохождение объекта управления по этапам ЖЦ (наступление событий) носит

¹ Патент РФ № 2793668, МПК В08В 15/02. Аспирационная пылеулавливающая установка / Фоменко Н.А., Душко О.В., Бурлаченко О.В., Ахмедов А.М., Фоменко В.Н., Бурлаченко А.О. Волгоград : ВолгГТУ, 2023.

Табл. 1. Анализ источников загрязнения воздуха на различных этапах ЖЦ ОКС

Table 1. Analysis of air pollution sources at various LC CCO stages

Событие (этап ЖЦ) / Event (LC stage)	Источники пылевого загрязнения Dust pollution sources
Инженерные изыскания (предпроектная подготовка) Engineering research (pre-project preparation)	Проходка инженерно-геологических выработок, исследования физико-механических свойств грунтов, гидрогеологические исследования, геокриологические исследования, инженерно-геофизические исследования Engineering and geological workings sinking, studies of physical and mechanical soils properties, hydrogeological studies, geocryological studies, engineering and geophysical studies
Производство и транспортировка строительных материалов и изделий Construction materials and products production and transportation	Производство сыпучих материалов, мелкоштучных материалов и блоков, утеплителей, металлических конструкций, обработка древесины, доставка к месту строительства Bulk materials Production, small-piece materials and blocks, insulation, metal structures, wood processing, delivery to the construction site
Реализация проекта (строительство) Project implementation (construction)	Земляные, монтажные, отделочные, транспортные работы Earthworks, general construction, finishing, transportation
Эксплуатация CCO operation	Работы, выполняемые при капитальном ремонте, реконструкции, расширении, техническом перевооружении The complex of works on capital repairs, reconstruction, expansion, technical re-equipment
Демонтаж и утилизация Dismantling and utilization	Работы в рамках демонтажа, рекультивации участка, транспортировки, рециклинга Complex of works on dismantling, site recultivation, transportation, recycling

случайный характер, поэтому данный процесс рассматривается как Марковский с определенными вероятностями наступления событий. В настоящей работе, в отличие от перечисленных, декомпозиция ЖЦ на этапы основана на выявлении событий, связанных с наибольшим загрязнением атмосферного воздуха мелкодисперсной пылью (рис. 1).

Из рис. 1 очевидно, что построенный граф переходов представляет собой замкнутую Марковскую цепь. Такой подход, базирующийся на применении аппарата исследования операций, позволяет описать ЖЦ объекта как восстанавливаемую систему.

Символом k обозначены порядковые номера наступления событий (этапов ЖЦ). Следует отметить, что авторы данной статьи принимают допущение о том, что в информационной среде понятия «событие» и «этап ЖЦ ОКС» эквивалентны, в то вре-

мя как в физическом смысле в течение одного этапа ЖЦ реального строительного объекта могут наступать различные события.

Согласно разработанной модели, движение объекта по ЖЦ, представленному в информационной среде, происходит следующим образом. После прохождения информационной модели ОКС концептуального этапа ЖЦ (анализ потребности) с вероятностью $p'_2(1) = 1$ наступает событие проведения инженерных изысканий в рамках предпроектной подготовки (т.е. второй этап ЖЦ). После этого объект попадает в этап проектирования с вероятностью $p'_3(2) = 1$. Вероятности попадания объекта в данные этапы равны 1, так как наступление этих событий носит безальтернативный характер. После этапа проектирования с вероятностью, равной 1, начинается реализация проекта. В связи со значимостью

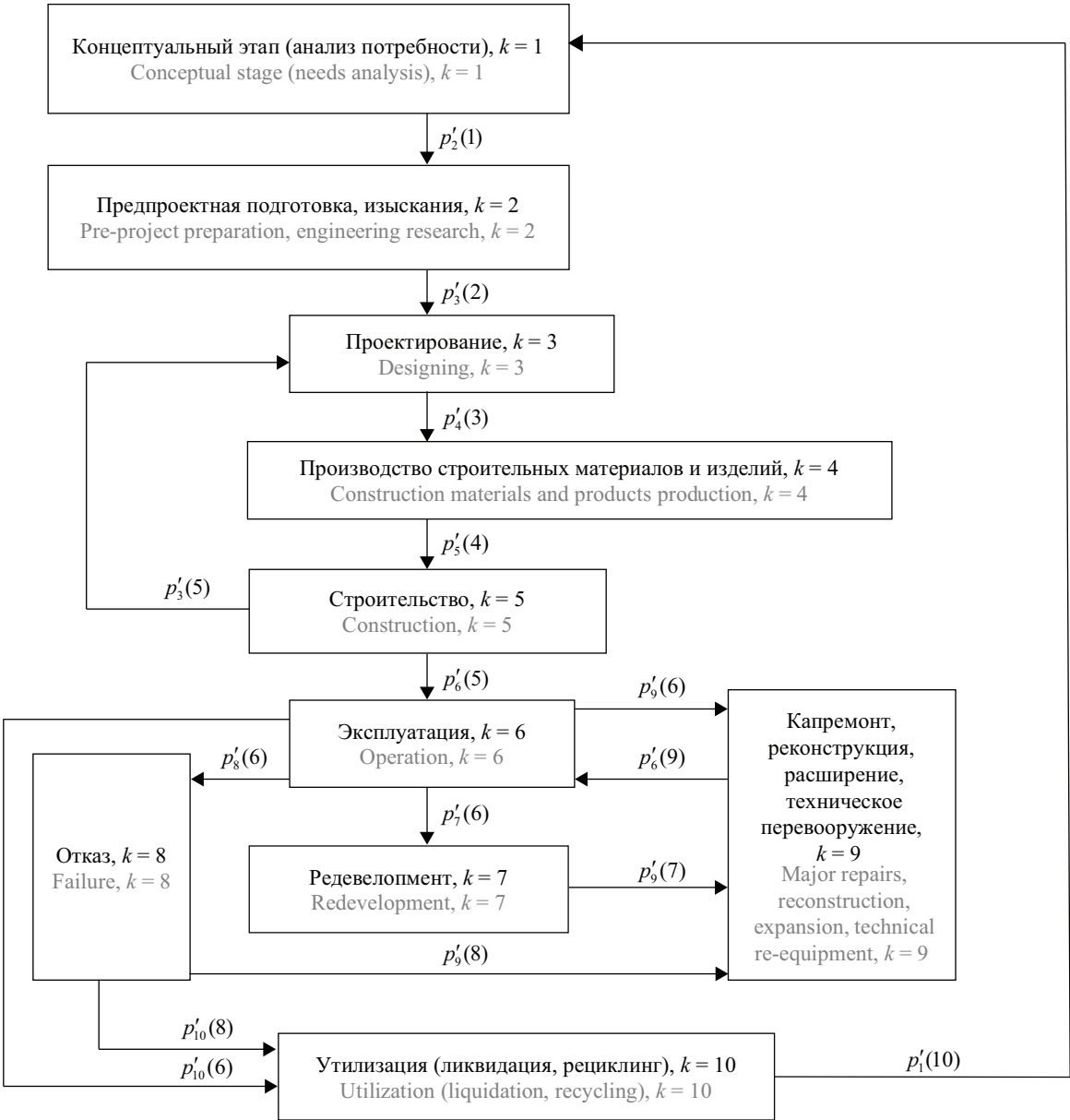


Рис. 1. Модель ЖЦ ОКС

Fig. 1. The LC CCO model

процесса производства строительных материалов, конструкций, полуфабрикатов и изделий с точки зрения пылевого загрязнения окружающей среды выделяем его как самостоятельное событие (этап ЖЦ), вероятность наступления которого $p'_4(3) = 1$. Вероятность наступления события начала строительномонтажных после этого $p'_5(4) = 1$.

Далее объект из этапа строительства переходит в этап эксплуатации. Вероятность этого события $p'_6(5)$. Однако, если при реализации проекта (т.е. строительстве) выявится недостаточная эффективность принятых на предыдущем этапе решений, необходим поиск альтернативного варианта с корректировкой принятых ранее технико-технологических решений. В этом случае объект в виртуальном смысле «вернется» в этап проектирования. Вероятность наступления этого события $p'_3(5) = 1 - p'_6(5)$.

На этапе эксплуатации возможно наступление четырех взаимоисключающих событий: возникновение отказа вследствие причин техногенного, природно-климатического характера и иных (с вероятностью $p'_8(6)$); принятие решения о редевелопменте объекта с изменением функционала ($p'_7(6)$), который с вероятностью $p'_9(7) = 1$ предполагает наступление события проведения реконструкции, технического перевооружения, расширения, капитального ремонта. Это же событие с вероятностью $p'_9(6)$ может наступить при нахождении объекта на этапе эксплуатации. Кроме того, объект по завершении этапа эксплуатации может с вероятностью $p'_{10}(6)$ перейти в этап утилизации.

После завершения мероприятий, выполняемых на этапе $k = 9$, объект возвращается в этап эксплуатации с вероятностью $p'_6(9) = 1$. В случае возникновения события отказа и принятия решения о невозможности дальнейшей эксплуатации объекта он с вероятностью $p'_{10}(8) = 1 - p'_9(8)$ переходит в этап утилизации.

Следует отметить, что в качестве объекта управления может выступать как инвестиционно-строительный процесс в целом, так и его отдельные элементы (в частности, здания, сооружения, развиваемые общественные пространства). По завершении этапа эксплуатации может приниматься решение как о ликвидации объекта, так и о продолжении эксплуатации какого-то из его элементов (например, возведение нового объекта на сохраняемом фундаменте). Также возможно принятие решения о реновации объекта. В последнем случае он подвергается преоб-

разованию в соответствии с требованиями, предъявляемыми к нему по обеспечению конкурентоспособности. Еще одна возможность продления физической жизни отдельных элементов объекта управления — повторное промышленное использование строительных отходов (рециклинг). Это возврат в промышленное производство материалов, которые содержатся в отходах строительства: металла, бетона, кирпича, древесины, стекла. Для принятия таких решений объект в информационном пространстве возвращается в концептуальный этап ЖЦ, что и предопределяет замкнутую структуру модели ЖЦ.

Поскольку, как было отмечено, граф на рис. 1 является конечной регулярной цепью Маркова, для определения вероятностей пребывания объекта на различных этапах ЖЦ (наступления событий) воспользуемся уравнениями Колмогорова². Такой подход позволяет установить вероятность наступления тех или иных событий в зависимости от принятого управленческого решения.

Вероятности наступления событий по рис. 1 — условные, поскольку зависят от вероятности наступления предшествующих событий. Для определения безусловных вероятностей наступления событий перехода объекта управления из одного этапа ЖЦ в другой построим матрицу инцидентности P_k на основе графа (рис. 1).

Построение данной матрицы основывается на следующем подходе. Все строки матрицы в отдельности описывают вероятность (причем условную) наступления того, что наступившее событие происходит из определенного предшествующего (т.е. попаданию на k -й этап ЖЦ предшествовал этап $k-1$). В этом случае строки показывают, какое событие было предшествующим для объекта, а столбцы — какое событие происходит на данный момент (на какой этап ЖЦ перешел объект). Соответственно 1-я строка матрицы содержит условные вероятности того, что управляемый объект перешел в текущее состояние из этапа утилизации, 2-я — из этапа ремонта, 3-я — отказа, 4-я — редевелопмента, 5-я — эксплуатации, 6-я — строительства, 7-я — производства строительных материалов и изделий, 8-я — проектирования, 9-я — предпроектной подготовки и изысканий, 10 — концептуального этапа.

На основании изложенного выше матрица инцидентности имеет вид:

$$\bar{P}_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_9(8) & p_{10}(8) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_7(6) & p_8(6) & p_9(6) & p_{10}(6) \\ 0 & 0 & p_3(5) & 0 & 0 & p_6(5) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

² Колмогоров А.Н. Об аналитических методах в теории вероятностей. УМН. 1938. № 5. С. 5–41.

Безусловные вероятности нахождения объекта на том или ином этапе ЖЦ на основе матрицы инцидентности определяем с применением методики³, адаптировав ее для нашей модели ЖЦ. В соответствии с принятой моделью k находится в интервале $[1-m]$, где $m = 10$ — количество этапов ЖЦ (событий).

Вероятность нахождения объекта в принятых этапах ЖЦ в этом случае определяется следующим образом:

$$P_1 = \frac{p'_1(10)}{1 + \sum_{k=1}^{m-1} p'_k(k-1)}; \quad (2)$$

$$P_2 = \frac{p'_2(1)}{1 + \sum_{k=1}^{m-1} p'_k(k-1)}; \quad (3)$$

$$P_3 = \frac{p'_3(2) + p'_3(5)}{1 + \sum_{k=1}^{m-1} p'_k(k-1)}; \quad (4)$$

$$P_4 = \frac{p'_4(3)}{1 + \sum_{k=1}^{m-1} p'_k(k-1)}; \quad (5)$$

$$P_5 = \frac{p'_5(4)}{1 + \sum_{k=1}^{m-1} p'_k(k-1)}; \quad (6)$$

$$P_6 = \frac{p'_6(5) + p'_6(9)}{1 + \sum_{k=1}^{m-1} p'_k(k-1)}; \quad (7)$$

$$P_7 = \frac{p'_7(6)}{1 + \sum_{k=1}^{m-1} p'_k(k-1)}; \quad (8)$$

$$P_8 = \frac{p'_8(6)}{1 + \sum_{k=1}^{m-1} p'_k(k-1)}; \quad (9)$$

$$P_9 = \frac{p'_9(6) + p'_9(7) + p'_9(8)}{1 + \sum_{k=1}^{m-1} p'_k(k-1)}; \quad (10)$$

$$P_{10} = \frac{p'_{10}(6) + p'_{10}(8)}{1 + \sum_{k=1}^{m-1} p'_k(k-1)}; \quad (11)$$

Для мониторинга загрязнения атмосферного воздуха пылевыми частицами $PM_{2.5}$ и PM_{10} на территории строительных площадок, жилых зон и других районов города использовали бюджетные измерители концентрации пыли. Среди недорогих измерителей концентрации пыли можно выделить датчики частиц, применяемые в портативных средствах мониторинга: PMS5003, NOVA SDS011, PMS1003, PMS3003, PMS7003, PPD42NS [14, 18, 19]. Представленные датчики пылевых частиц используются в общественных сетях мониторинга Sensor.Community. Профессиональные датчики частиц Alphasense OPC-N2 применяются в приборе AirExpert Mini, разработанном фирмой ООО «Союзатом-прибор» (проходят испытания в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», г. Санкт-Петербург). Датчик PMS5003 используется в переносном измерителе концентрации мелкодисперсных аэрозолей (ПИКМА).

Измерение концентрации тонкодисперсных частиц выполнили путем прохождения газовой смеси через датчик. Лазерное излучение, проходящее через воздушную смесь, содержащую в своем составе твердые частицы, рассеивается ими; в зави-



Рис. 2. Мобильный измеритель концентрации пыли AirExpert Mini PM

Fig. 2. Mobile Dust Concentration Meter AirExpert Mini PM



Рис. 3. Измеритель концентрации мелкодисперсных аэрозолей (ПИКМА)

Fig. 3. Fine aerosol concentration meter (PICMA)

³ Бурлаченко О.В., Шумячер В.М. Информационно-технологическое обеспечение эксплуатационных свойств машин и оборудования на основе системы комплексных воздействий : монография. Волгоград : ВолГАСУ, 2005. 266 с.

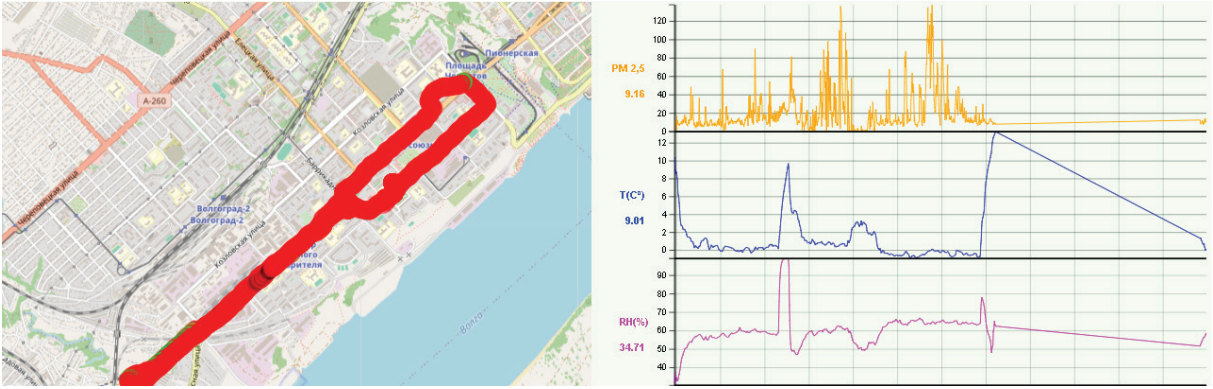


Рис. 4. Пример необработанных данных концентрации $PM_{2,5}$ (без учета метеорологических параметров)

Fig. 4. Example of raw $PM_{2,5}$ concentration data (excluding meteorological parameters)

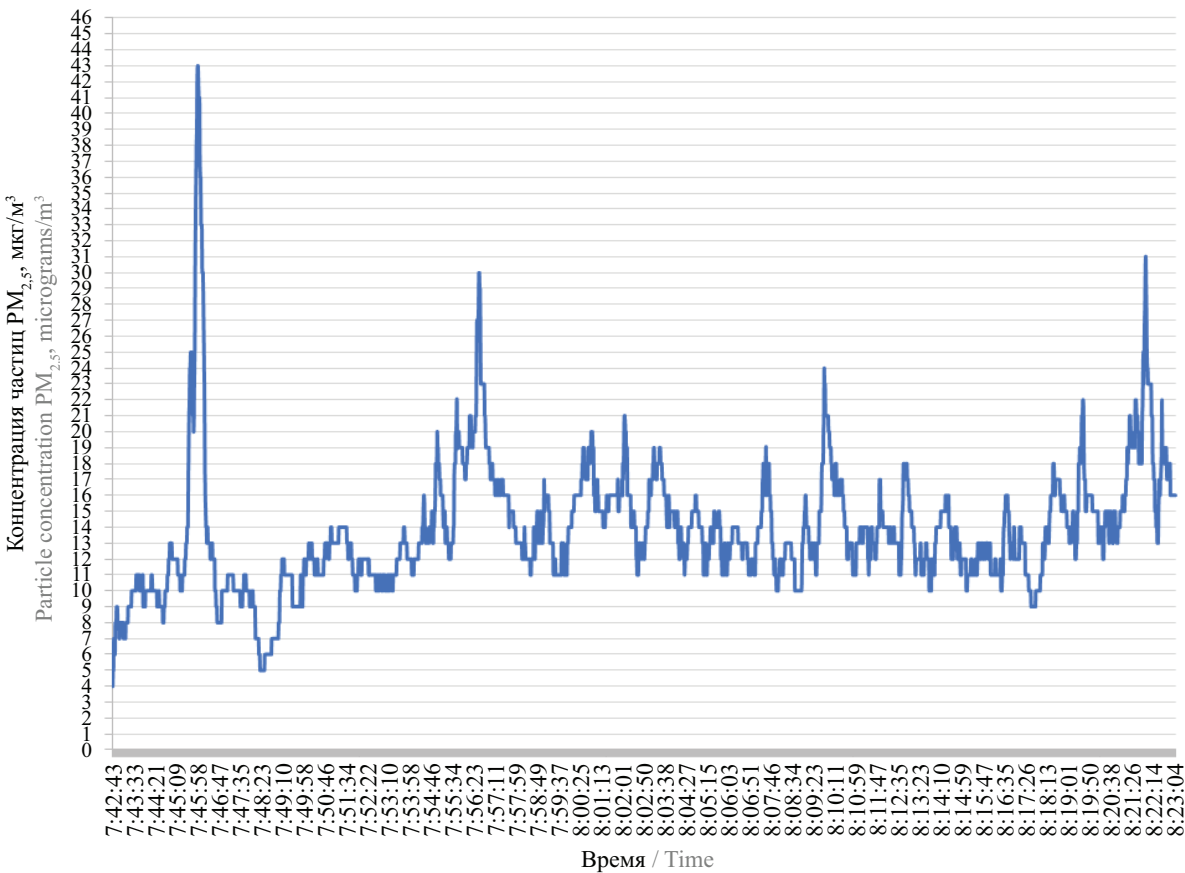


Рис. 5. Необработанные данные концентрации $PM_{2,5}$ (без учета метеорологических параметров)

Fig. 5. Raw $PM_{2,5}$ concentration data (excluding meteorological parameters)

симости от угла рассеяния и длины сигналов, попадающих на фотоприемник, определяли их диаметр и концентрацию (рис. 2, 3) [19].

Преимуществом измерителя AirExpert Mini PM является возможность передачи данных концентрации пыли в реальном времени на сайт (рис. 4).

Переносной измеритель концентрации мелкодисперсных аэрозолей в отличие от представленного AirExpert Mini PM записывает свои данные на встроенную SD-карту, также дополнительно в приборе установлен модуль GPS, с помощью ко-

торого происходит синхронизация даты и времени, определяется местоположение. Необработанные данные переносного измерителя концентрации пыли представлены на рис. 5.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведенных исследований адаптирована созданная авторами ранее модель, согласно которой в качестве показателя эффективности при выборе тех или иных решений по управлению ОКС на протяжении ЖЦ предложен универсальный

критерий [6]. В данной работе этот критерий оптимизации определяется исходя из расчетных значений приведенных удельных затрат на реализацию управляющих решений, степени пылевого загрязнения при выполнении различных работ в соответствии с принятыми решениями, а также вероятности наступления различных событий в зависимости от принятых решений. В нашем случае это, например, концентрация пыли на границе участка производства работ:

$$K_i = \sum_{k=1}^m \frac{C_{пр.уд.ik} \cdot \lambda_{ik}}{P_{ik} \cdot ПДК}, \quad (12)$$

где K_i — приведенный критерий, который позволяет в численном выражении представить эффективность i -го управленческого решения; $C_{пр.уд.ik}$ — технико-экономическая эффективность реализации i -го варианта из рассматриваемых управленческих решений на k -м этапе ЖЦ, которая рассчитывается как приведенные удельные затраты; λ_{ik} — значения

концентрации пылевого загрязнения воздушной среды, полученные экспериментальным или теоретическим путем³ (определяются как максимальные значения в контрольных точках на границах участка производства работ); ПДК — предельно допустимая концентрация мелкодисперсной пыли (максимальный разовый уровень для взвешенных частиц $PM_{2.5}$ — 160 мкг/м³, для PM_{10} — 300 мкг/м³)⁴.

Сформирована база данных о значениях концентрации пылевого загрязнения атмосферного воздуха при выполнении работ на всех этапах ЖЦ в соответствии с принятой декомпозицией. Некоторые данные измерений представлены в табл. 2.

³ Методы расчетов рассеивания вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе : утв. Приказом Минприроды РФ от 06.06.2017 № 273. М. : Ростехнадзор, 2017. 110 с.

⁴ СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания (с Изменениями на 30.12.2022). Табл. 1.1 п.п. 110–112.

Табл. 2. Экспериментальные данные о содержании мелкодисперсной пыли при некоторых видах работ для расчета эффективности рассматриваемых управленческих решений

Table 2. Experimental data on the fine dust concentration in some types of work to calculate the effectiveness of the management decisions under consideration

Этапы ЖЦ в соответствии с принятой декомпозицией Stages of the LC in accordance with the accepted decomposition	Виды работ, вызывающие загрязнение атмосферного воздуха Types of work that cause atmospheric air pollution	Максимальная разовая концентрация мелкодисперсной пыли, мг/м ³ , при скорости ветра, не превышающей 9 м/с Maximum single concentration of fine dust, mg/mm ³ , at a wind speed not exceeding 9 m/s	
		на строительной площадке at the construction site	на расстоянии 100 м от рабочей зоны at a distance of 100 m from the work area
Инженерные изыскания (предпроектная подготовка) Engineering surveys (pre-design preparation)	Определение уровня грунтовых вод механическим способом Determination of the groundwater level by mechanical means	18–20	9–11
Производство и транспортировка строительных материалов и изделий Production and transportation of building materials and products	Производство цементных смесей Production of cement mixtures	23–25	7–9
Реализация проекта (строительство) Project implementation (construction)	Производство кирпичной кладки Production of brickwork	16–18	3–4
Эксплуатация Exploitation	Демонтаж керамической плитки Dismantling of ceramic tiles	26–30	8–10
Демонтаж и утилизация Dismantling and disposal	Демонтаж железобетонных конструкций Dismantling of reinforced concrete structures	32–40	10–12

Табл. 3. Вероятность превышения концентрации загрязняющего вещества (пыль неорганическая до 20 %) за пределами санитарно-защитной зоны

Table 3. The probability of exceeding the concentration of a contaminant (inorganic dust up to 20 %) outside the sanitary protection zone

Вид операции Operation type	Концентрация мелкодисперсных частиц, мг/м³ Concentration of fine particles, mg/m³		Общая концентрация (C _Σ), мг/м³ Total concentration, (C _Σ), mg/m³	Вероятность превышения ПДК _{МР} (P _{ik}) The probability of exceeding the MPC (P _{ik})
	Не более 10 мкм (PM ₁₀) No more than 10 microns (PM ₁₀)	Не более 2,5 мкм (PM _{2,5}) No more than 2.5 microns (PM _{2,5})		
Смешивание строительных растворов (цементных и песчаных) [14] Mixing of building mortars (cement and sand) [14]	4,76	0,265	–	0,15
Смешивание бетона (цемента, песка и крупнозернистых заполнителей) [14] Mixing of concrete (cement, sand and coarse-grained aggregates) [14]	7,36	0,47	–	До 0,21 To 0.21
Укладка монолитных бетонных блоков [20] Mixing of concrete (cement, sand and coarse-grained aggregates) [20]	1,017	0,175	0,432	До 0,12 To 0.12
Укладка слоя основания дорожного полотна [21] Laying the base layer of the roadway [21]	0,48	0,02	–	До 0,06 To 0.06
Резка деревянной плитки [22] Cutting of wooden tiles [22]	–	–	3,458	До 0,08 To 0.08
Уборка рабочей площадки [22] Cleaning of the work site [22]	–	–	1,217	До 0,24 To 0.24
Подготовка к нанесению лакокрасочного покрытия [22] Preparation for the application of paint and varnish coating [22]	–	–	32	До 0,42 To 0.42
Оштукатуривание [22] Plastering [22]	–	–	2,678	До 0,07 To 0.07

На этапе строительства объекта вероятность превышения максимальной разовой предельно-допустимой концентрации (ПДКМР) мелкодисперсной пыли за пределами санитарно-защитной зоны при проведении технологических операций приведена в табл. 3.

Подставляя в формулу (12) данные, полученные с помощью применения построенной системы информационного обеспечения, определили наиболее эффективное решение по управлению ЖЦ ОКС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанное информационное обеспечение позволяет учитывать случайный характер наступления тех или иных событий в течение ЖЦ ОКС с определением вероятности их наступления. Помимо того, введение в модель критерия, учитывающего степень пылевого загрязнения, дает возможность выбирать решение по управлению ЖЦ ОКС с минимизацией загрязнения атмосферного воздуха.

Предложенная модель использовалась в качестве системы информационного обеспечения принятия оптимальных решений по управлению ЖЦ реальных объектов в г. Волгограде. Применение разработанной модели на протяжении всех этапов ЖЦ таких объектов продемонстрировало снижение трудоемкости поиска (до 14 %) и повышение эффективности и экологической безопасности (за счет

снижения до 20 % степени загрязнения атмосферного воздуха) управленческих решений.

Данная статья подготовлена в рамках выполнения гранта молодых ученых ВолгГТУ, финансируемого из средств программы «Приоритет–2030» «Разработка системы информационно-технологического обеспечения качества окружающей среды в условиях городской агломерации».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Теличенко В.И., Липидус А.А., Морозенко А.А. Информационное моделирование технологий и бизнес-процессов в строительстве. М. : Издательство АСВ, 2008. 144 с. EDN SAPKVZ.
2. Гинзбург А.В., Нестерова Е.И. Технология непрерывной информационной поддержки жизненного цикла строительного объекта // Вестник МГСУ. 2011. № 5. С. 317. EDN OWECEN.
3. Katanov I., Lapidus A. Mobile building life cycle // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 193. P. 03011. DOI: 10.1051/matecconf/201819303011
4. Бурлаченко О.В., Елфимов К.А., Бунин Д.В. Информационное обеспечение управления жизненным циклом строительных объектов в концепции BIM // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2018. № 54 (73). С. 217–221. EDN YUMLJJ.
5. Абрамян С.Г., Бурлаченко О.В., Оганесян О.В., Бурлаченко А.О. Система управления жизненным циклом объектов капитального строительства с использованием цифровых технологий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. № 4 (85). С. 305–313. EDN QZAXQX.
6. Азаров В.Н., Бурлаченко А.О. Организация строительного производства с учетом экологичной безопасности принимаемых решений // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2023. № 1 (41). С. 76–83. DOI: 10.21869/2311-1518-2023-41-1-76-83. EDN KKXFQT.
7. Абрамян С.Г., Бурлаченко О.В., Оганесян О.В., Бурлаченко А.О., Плешаков В.В. Возможности цифровых технологий для каждого этапа жизненного цикла строительной системы // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. № 2 (87). С. 317–325. EDN TJMJSS.
8. Абрамян С.Г., Бурлаченко О.В., Оганесян О.В., Соболева Е.Д., Бурлаченко А.О., Плешаков В.В. К вопросу о стадиях жизненного цикла строительных систем в контексте принципов информационного моделирования // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6 (90). С. 607–620. EDN ETPPQZ.
9. Muleski G.E., Cowherd C., Kinsey J.S. Particulate emissions from construction activities // Journal of the Air & Waste Management Association. 2005. Vol. 55. Issue 6. Pp. 772–783. DOI: 10.1080/10473289.2005.10464669
10. Azarmi F., Kumar P., Marsh D., Fuller G. Assessment of the long-term impacts of PM₁₀ and PM_{2.5} particles from construction works on surrounding areas // Environmental Science: Processes & Impacts. 2016. Vol. 18. Issue 2. Pp. 208–221. DOI: 10.1039/c5em00549c
11. Калюжина Е.А., Сергина Н.М., Елфимов К.А., Стреляева А.Б. Исследование пылевыделений в окружающую атмосферу и в атмосферу рабочей зоны при производстве ремонтно-строительных работ // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 4 (81). С. 371–378. EDN CCPQTW.
12. Luo Q., Huang L., Liu Y., Xue X., Zhou F., Hua J. Monitoring study on dust dispersion properties during earthwork construction // Sustainability. 2021. Vol. 13. Issue 15. P. 8451. DOI: 10.3390/su13158451
13. Азаров В.Н., Елфимов К.А., Давудов Р.И.О., Васильев А.Н., Симаков В.С. Об использовании случайных функций для анализа пылевого загрязнения пешеходных зон // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. № 2 (87). С. 171–177. EDN HRHQRM.
14. Khan M., Khan N., Skibniewski M.J., Park C. Environmental Particulate Matter (PM) exposure assessment of construction activities using low-cost pm sensor and latin hypercubic technique // Sustainability. 2021. Vol. 13. Issue 14. P. 7797. DOI: 10.3390/su13147797
15. Yang J., Shi B., Shi Y., Marvin S., Zheng Y., Xia G. Air pollution dispersal in high density urban areas: Research on the triadic relation of wind, air pollution, and urban form // Sustainable Cities and Society. 2020. Vol. 54. P. 101941. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101941
16. Tao G.W., Feng J.C., Feng H.B., Feng H., Zhang K. Reducing construction dust pollution by planning construction site layout // Buildings. 2022. Vol. 12. Issue 5. P. 531. DOI: 10.3390/buildings12050531
17. Сысоева Е.В., Гильманова М.О. Assessment of PM_{2.5} particulate air pollution near highways // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 6. С. 889–900. URL:

<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54137525> DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.889-900

18. Kaur K., Kelly K.E. Performance evaluation of the Alphasense OPC-N3 and Plantower PMS5003 sensor in measuring dust events in the Salt Lake Valley, Utah // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2023. Vol. 16. Issue 10. Pp. 2455–2470. DOI: 10.5194/amt-16-2455-2023

19. Schwarz A.D., Meyer J., Dittler A. Opportunities for low-cost particulate matter sensors in filter emission measurements // *Chemical Engineering & Technology*. 2018. Vol. 41. Issue 9. Pp. 1826–1832. DOI: 10.1002/ceat.201800209

20. Cheriyan D., Choi J.H. Data on different sized particulate matter concentration produced from a con-

struction activity // *Data in Brief*. 2020. Vol. 33. P. 106467. DOI: 10.1016/j.dib.2020.106467

21. Сидякин П.А., Маринин Н.А., Шульга С.В., Чичилов К.О. Дорожно-строительные работы как источник пылевого загрязнения воздушной среды // *Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура*. 2014. № 2 (15). С. 72–76. DOI: 10.17673/Vestnik.2014.02.12. EDN SXUBJX.

22. Kohlman-Rabbani E.R., Shapira A., Martins A.R.B., Barkokébas B. Characterization and evaluation of dust on building construction sites in Brazil // *The Open Occupational Health & Safety Journal*. 2014. Vol. 5. Issue 1. Pp. 1–8. DOI: 10.2174/1876216601405010001

Поступила в редакцию 6 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 9 января 2024 г.

Одобрена для публикации 10 января 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Валерий Николаевич Азаров** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Институт архитектуры и строительства, советник РААСН; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 148320, Scopus: 7004170297, ORCID: 0000-0003-0944-0232; azarovpubl@mail.ru;

Олег Васильевич Бурлаченко — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии строительного производства, заместитель директора Института архитектуры и строительства по научной работе; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 282520, Scopus: 417611032900, ResearcherID: ABF-4142-2020, ORCID: 0000-0001-7923-6742; oburlachenko@yandex.ru;

Александр Олегович Бурлаченко — младший научный сотрудник, аспирант кафедры безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Институт архитектуры и строительства; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 1161260, Scopus: 57207734779, ResearcherID: NHM-5981-2022, ORCID: 0000-0001-3471-2893; a.o.burlachenko@gmail.com;

Мария Денисовна Азарова — магистрант, Институт архитектуры и строительства; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 1186126, ORCID: 0009-0009-3147-4333; azarovamaria@yandex.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Telichenko V.I., Lapidus A.A., Morozenko A.A. *Information modeling of technologies and business processes in construction*. Moscow, ASV Publishing House, 2008; 144. EDN SAPKVZ. (rus.).

2. Ginzburg A.V., Nesterova E.I. Technology of continuous information support of life cycle of construction object. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 5:317. EDN OWECEN. (rus.).

3. Katranov I., Lapidus A. Mobile building life cycle. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 193:03011. DOI: 10.1051/mateconf/201819303011

4. Burlachenko O.V., Elfimov K.A., Bunin D.V. Information support of life cycle management

of construction projects in conception of BIM. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2018; 54(73):217-221. EDN YUMLJJ. (rus.).

5. Abramyan S.G., Burlachenko O.V., Oganesyan O.V., Burlachenko A.O. The life cycle management system for the capital construction objects using digital technologies. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2021; 4(85):305-313. EDN QZAXQX. (rus.).

6. Azarov V.N., Burlachenko A.O. The construction production organization taking into account the ecological safety of the decisions taken. *Biospheric Comput-*

ibility: *Human, Region, Technologies*. 2023; 1(41):76-83. DOI: 10.21869/2311-1518-2023-41-1-76-83. EDN KKXFQT. (rus.).

7. Abramyan S.G., Burlachenko O.V., Oganesy-an O.V., Burlachenko A.O., Pleshakov V.V. Possibilities of digital technologies for each stage of the life cycle of the building system. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2022; 2(87):317-325. EDN TJMJSS. (rus.).

8. Abramyan S.G., Burlachenko O.V., Oganesy-an O.V., Soboleva E.D., Burlachenko A.O., Pleshakov V.V. On the issue of the building systems life cycle stages in the context of the principles of information modeling. *Engineering journal of Don*. 2022; 6(90):607-620. EDN ETPPQZ. (rus.).

9. Muleski G.E., Cowherd C., Kinsey J.S. Particulate emissions from construction activities. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2005; 55(6):772-783. DOI: 10.1080/10473289.2005.10464669

10. Azarmi F., Kumar P., Marsh D., Fuller G. Assessment of the long-term impacts of PM₁₀ and PM_{2.5} particles from construction works on surrounding areas. *Environmental Science: Processes & Impacts*. 2016; 18(2):208-221. DOI: 10.1039/c5em00549c

11. Kalyuzhina E.A., Sergina N.M., Elfimov K.A., Strelyaeva A.B. Research of dust release in the surrounding atmosphere and into the atmosphere of the working area in production of repair and construction works. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2020; 4(81):371-378. EDN CCPQTW. (rus.).

12. Luo Q., Huang L., Liu Y., Xue X., Zhou F., Hua J. Monitoring study on dust dispersion properties during earthwork construction. *Sustainability*. 2021; 13(15):8451. DOI: 10.3390/su13158451

13. Azarov V.N., Elfimov K.A., Davudov R.I., Vasilev A.N., Simakov V.S. On the use of random functions for the analysis of dust pollution of pedestrian zones. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2022; 2(87):171-177. EDN HRHQRM. (rus.).

14. Khan M., Khan N., Skibniewski M.J., Park C. Environmental Particulate Matter (PM) exposure assessment of construction activities using low-cost PM sensor and latin hypercubic technique. *Sustainability*. 2021; 13(14):7797. DOI: 10.3390/su13147797

15. Yang J., Shi B., Shi Y., Marvin S., Zheng Y., Xia G. Air pollution dispersal in high density urban areas: Research on the triadic relation of wind, air pollution, and urban form. *Sustainable Cities and Society*. 2020; 54:101941. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101941

16. Tao G.W., Feng J.C., Feng H.B., Feng H., Zhang K. Reducing construction dust pollution by planning construction site layout. *Buildings*. 2022; 12(5):531. DOI: 10.3390/buildings12050531

17. Sysoeva E.V., Gelmanova M.O. Assessment of PM_{2.5} particulate air pollution near highways. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(6):889-900. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54137525> DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.889-900

18. Kaur K., Kelly K.E. Performance evaluation of the Alphasense OPC-N3 and Plantower PMS5003 sensor in measuring dust events in the Salt Lake Valley, Utah. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2023; 16(10):2455-2470. DOI: 10.5194/amt-16-2455-2023

19. Schwarz A.D., Meyer J., Dittler A. Opportunities for low-cost particulate matter sensors in filter emission measurements. *Chemical Engineering & Technology*. 2018; 41(9):1826-1832. DOI: 10.1002/ceat.201800209

20. Cheriyan D., Choi J.H. Data on different sized particulate matter concentration produced from a construction activity. *Data in Brief*. 2020; 33:106467. DOI: 10.1016/j.dib.2020.106467

21. Sidiyakin P., Marinin N., Shul'ga S., Chichirov K. Road construction works as source of dust air pollution. *Vestnik SGASU. Town Planning and Architecture*. 2014; 2(15):72-76. DOI: 10.17673/Vestnik.2014.02.12. EDN SXUBJX. (rus.).

22. Kohlman-Rabbani E.R., Shapira A., Martins A.R.B., Barkokébas B. Characterization and evaluation of dust on building construction sites in Brazil. *The Open Occupational Health & Safety Journal*. 2014; 5(1):1-8. DOI: 10.2174/1876216601405010001

Received October 6, 2023.

Adopted in revised form on January 9, 2024.

Approved for publication on January 10, 2024.

BIONOTES: Valerii N. Azarov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Life Safety in Construction and Urban Economy, Institute of Architecture and Construction, Advisor to RAASN; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI: 148320, Scopus: 7004170297, ORCID: 0000-0003-0944-0232; azarovpubl@mail.ru;

Oleg V. Burlachenko — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction Production Technology, Deputy Director of the Institute of Architecture and Construction for Research; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI:

282520, Scopus: 417611032900, ResearcherID: ABF-4142-2020, ORCID: 0000-0001-7923-6742; oburlachenko@yandex.ru;

Alexander O. Burlachenko — junior researcher, postgraduate student of the Department of Life Safety in Construction and Urban Economy, Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VolgSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI: 1161260, Scopus: 57207734779, ResearcherID: HHM-5981-2022, ORCID: 0000-0001-3471-2893; a.o.burlachenko@gmail.com;

Maria D. Azarova — master's student, Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI: 1186126, ORCID: 0009-0009-3147-4333; azarovamaria@yandex.ru.

Authors' contribution: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.