

Методические подходы к управлению техническим состоянием многослойных ограждающих конструкций зданий

В процессе эксплуатации зданий с многослойными ограждающими конструкциями, в том числе навесных вентилируемых фасадов (НВФ), одним из показателей, определяющих долговечность последних, является надежность их элементов, технологий и качество строительно-монтажных работ. Рассмотрен подход к продлению жизненного цикла зданий путем увеличения срока службы навесных вентилируемых фасадов за счет создания системы управления техническим состоянием, основанной на многокритериальной оценке технических и экономических параметров, математического моделирования надежности и долговечности элементов НВФ, разработки инновационных конструктивных решений и технологий, объединенных методикой управления техническим состоянием НВФ.

Разработана вероятностная модель износа элементов многослойных ограждающих конструкций, позволяющая оценить их долговечность.

Введена и обоснована новая для строительной отрасли категория – «строительно-эксплуатационный модуль» (СЭМ), понимаемый как совокупность несущей части здания и многослойной ограждающей конструкции, геометрические размеры которой совпадают с поверхностью внутренней вертикальной части стены.

Обосновано определение сложности системы как совокупности числа СЭМ и типов конструктивных элементов. Определены количественные и качественные критерии эффективности управления техническим состоянием навесных вентилируемых фасадов. Установлен характер изменения вероятностей того, что показатели оценок СЭМ не превысят допустимых значений.

Предложены мероприятия по управлению техническим состоянием навесных фасадов, заключающиеся в контроле и мониторинге СЭМ, которые позволяют выявить отказы и предотказные состояния, что является основой планирования ремонтов фасадов или замены на новые элементы.

Ключевые слова: *навесной вентилируемый фасад, износ, энергоэффективность, долговечность, строительно-эксплуатационный модуль.*

В регионах России появляются новые современные здания: бизнес-центры, торговые-развлекательные комплексы, гостиницы и жилые дома.

Западные технологии нашли широкое применение в России. Однако условия эксплуатации, природно-климатические факторы и профессионализм специалистов в нашей стране существенно отличались от европейских. Поэтому для развития данного направления строительной индустрии в условиях России, особенно в Сибири, было необходимо накопление статистики эксплуатации, а также дополнительное исследование основных параметров функционирования навесных фасадов. Так, в Новосибирске возведено достаточно большое число высотных зданий с применением оригинальных решений в области архитектуры фасада.

Повышенные требования к энергоэффективности оболочек зданий и общая концепция возведения любого объекта в повсеместном строительстве предусматривают устройство навесных фасадов. Фасадные системы и конструкции в настоящее время широко используются для отделки фасадов новостроек, а также

при ремонтах и реконструкции старых домов. Одной из причин активного применения навесных вентилируемых фасадов (НВФ) является удобство проведения монтажа и дальнейшего обслуживания. Кроме того, к серьезным достоинствам можно отнести то, что вентилируемые фасады весьма нетребовательны к предварительной подготовке наружных стен [1, 2].

Однако к навесным фасадным системам с воздушным зазором предъявляются определенные требования. Комплексные технические условия должны содержать раздел, в котором по отношению к фасадным системам были бы определены требования по обеспечению их долговечности, надежности и безопасности в процессе строительства объекта, гарантийного срока эксплуатации и срока службы фасадных систем.

Для этого необходимо выполнение расчетов и экспертных заключений о возможности применения фасадной системы, содержащих информацию о коррозионной стойкости (долговечности не менее 50 лет) элементов фасадной системы; расчет статических и ветровых нагрузок с учетом турбулентной составляющей и результатов обдува макета здания в

аэродинамической трубе или методом математического моделирования; теплотехнический расчет (сопротивление теплопередаче, влажностный режим с определением вероятности выпадения конденсата на облицовке или утеплителе и расчет узлов сопряжения фасадной системы теплоизоляции со светопрозрачной конструкцией).

На основе обзора и анализа НВФ мы пришли к выводу *о положительной роли фасадных систем в конструктивных решениях зданий и целесообразности их массового применения в условиях воздействия природно-климатических и техногенных факторов Сибири.*

В ряде работ отечественных и зарубежных ученых исследуется опыт проектирования и эксплуатации вентилируемых фасадных систем в разнообразных климатических условиях, проблемы технологического характера, возникающие при монтаже, эксплуатации и демонтаже систем с навесными вентилируемыми фасадами, анализируются наиболее значимые факторы, определяющие надежность, долговечность и качество НВФ [3, 4]. Известны работы по энергоэффективности зданий с позиции оценки их безотказной работы, по визуально-инструментальному обследованию и тепловизионному контролю качества тепловой защиты, по расчетным оценкам теплотехнических показателей ограждающих конструкций. В процессе эксплуатации НВФ происходит их износ, требующий периодических ремонтов жилых зданий, в том числе капитального ремонта, с оценкой эффективности организационно-технологических решений и ряда других аспектов НВФ [5, 6].

Известные методы и модели надежности объектов применительно к НВФ не в полной мере учитывают особенности их использования в условиях Сибири. До настоящего времени не выделена в самостоятельную проблема управления техническим состоянием НВФ.

Под *управлением техническим состоянием* ограждающих конструкций, в том числе НВФ, мы понимаем целенаправленные воздействия по восстановлению номинальных или близких к ним значений параметров долговечности и энергоэффективности с целью поддержания их в допустимых пределах для обеспечения снижения опасности отказов.

Поэтому нами была поставлена задача разработать модель оценки долговечности и надежности многослойных ограждающих конструкций зданий методами вероятностного моделирования.

Предлагаемая модель базируется на вероятности износа элементов многослойных ограждающих конструкций.

Под *долговечностью* многослойных ограждающих конструкций понимают свойства каждого материала, составляющего конструкцию, и конструкции в целом сохранять работоспособность до предельно допустимого состояния с учетом потенциально возможных ремонтов [7, 8].

Износ характеризуется временем ухудшения эксплуатационных качеств материалов и носит вероятностный характер, который может быть описан уравнением параболы q -й степени (рис. 1).

Точкой A на кривой 1 обозначен момент времени t^* , при котором износ с вероятностью $P = 0,5$ составит 50 % запланированного ресурса при сроке службы T .

Точки A' , A'' обозначают моменты времени t' и t'' , при которых те же 50 % износа наступят на запланированном периоде T (кривые 2, 3).

К концу срока службы T прогнозируется полный износ с вероятностью $P = 1$ (кривые 1, 2, 3). В соответствии с кривой 4 износ материалов на конец периода T может произойти с вероятностью $P = 0,9$ и т.д.

Вероятность

$$P(t) = \frac{1}{T^q} t^q. \quad (1)$$

Задавая предельные значения износа материалов и конструкций, можно установить их долговечность. Однако в процессе реальной эксплуатации отказ элементов НВФ может наступить в иной, отличный от заданного предельного значения момент времени.

Метод вероятностного моделирования применяется в случаях недостаточности физических или статистических данных. Уникальность решения достигается соглашением экспертов с применением метода экспертных оценок.

Множество стандартов европейских стран построено на детерминированном проектировании классическими методами. Полное вероятностное проектирование описано в Евро-

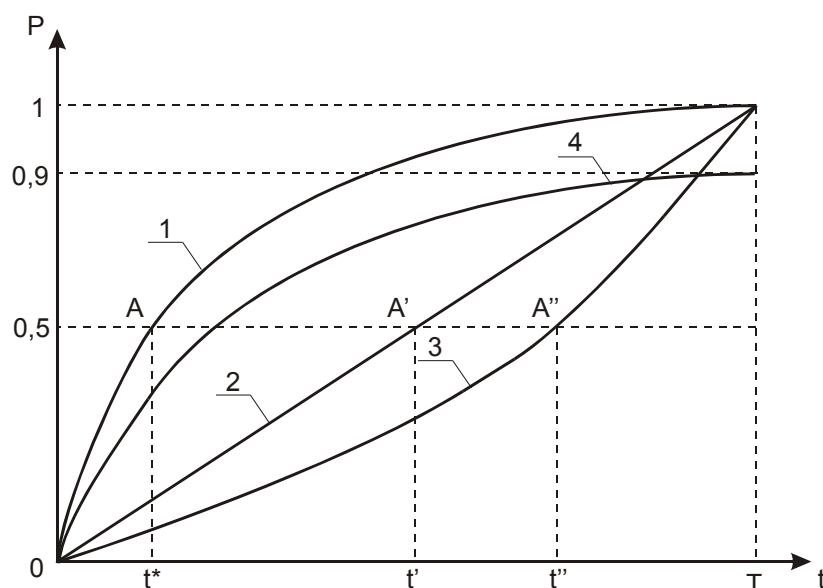


Рис. 1. Вероятность износа элементов многослойных ограждающих конструкций

стандарте EN 1990 «Основы проектирования сооружений» (проект июля 2000 г.). Стандарт Международной организации по стандартизации «Общие принципы надежности строений» (ISO-2394) рассматривает вероятностный метод как метод учета различных факторов. За основной показатель, характеризующий безопасность зданий, принят главный индекс надежности β . В России еще предстоит создать соответствующий стандарт.

В процессе проведения исследований нам предстояло обосновать основные характеристики и критерии эффективности системы управления техническим состоянием навесных вентилируемых фасадов.

Процесс изменения технического состояния зданий удобно описать математически. С этой целью мы ввели новую категорию – «строительно-эксплуатационный модуль» (СЭМ).

СЭМ – совокупность несущей части здания и многослойной ограждающей конструкции, геометрические размеры которой совпадают с поверхностью внутренней вертикальной части стены. В этом случае вся внешняя площадь здания представляет собой сумму СЭМ [9].

Основные характеристики системы управления техническим состоянием (УТС) НВФ мы представили тремя группами: количественными, качественными характеристиками УТС и информационными качественными характеристиками. Для них определили показатели и критерии эффективности.

Количественные характеристики УТС НВФ описываются количеством строительно-эксплуатационных модулей, трудоемкостью производства монтажных работ, трудоемкостью эксплуатации навесных фасадов, сметной стоимостью, экономической эффективностью системы управления техническим состоянием НВФ. В качестве критериев мы назначили минимум трудозатрат, минимум затрат на эксплуатацию СЭМ, минимум времени производства работ.

Качественные характеристики УТС НВФ включают надежность, долговечность, ремонтпригодность, предельное состояние надежности, дефект, повреждение, отказ, наработку. Критериями эффективности считаем целесообразным принять следующие: максимум срока службы, минимум числа отказов СЭМ, максимум времени до отказа системы.

Качественные характеристики информации: комплексность принимаемых решений (полнота) при управлении техническим состоянием НВФ, достоверность принимаемых решений; критерий – максимум достоверности (минимум энтропии) [10, 11].

Под *сложностью системы* понимается величина

$$S = \sum_{i=1}^n S_i K_i, \quad (2)$$

где S_i – сложность элементов i -го типа ограждающей конструкции; K_i – число СЭМ i -го типа, входящих в систему; n – количество ти-

пов элементов в системе (СЭМ с окном, балконной дверью, подъездов и др.).

В качестве мероприятий по управлению техническим состоянием (МУТС) навесных фасадов могут выступать:

- мониторинг СЭМ;
- технический контроль качества элементов, направленный на выявление отказа или предотказного состояния;
- планирование замены СЭМ на новые вставки или восстановление их работоспособного состояния;
- организация и проведение восстановительных работ и др.

Обозначим через m число модулей (МУТС), а x_0 – количество позиций, влияющих на управление техническим состоянием, т.е. $x_0 = m$.

Структура МУТС определяет контуры системы управления техническим состоянием.

Введем дополнительные обозначения: m_j – количество МУТС, включенных в j -й контур управления; x_j – число позиций, определяющих управление техническим состоянием, включенных в j -й контур управления (мониторинг, техническое обслуживание, восстановление без замены материала СЭМ, восстановление с заменой отдельных элементов СЭМ, замена СЭМ).

Фактически $x_j = m_j$. Очевидно, что $x_j \leq x_0$, $m_j \in m$. Если какой-либо модуль k повторно используется в контурах j_1 и j_2 , то $T_{j_1} \cap T_{j_2} \neq \emptyset$. Если в этих контурах повторно используются S элементарных модулей, то $|T_{j_1} \cap T_{j_2}| = S$. Примем число единичных позиций в j -м контуре управления, реализуемых МУТС m_j , за a_j . Пусть k ($k \in m$) – элементарный модуль управления, повторно используемый S_{kj} раз. Тогда $\sum_{j=1}^n S_{kj}$ – общее число единичных реализаций k -го модуля управления; $\sum_{k \in T} S_{kj}$ – общее число единичных реализаций элементарных позиций в j -м контуре управления, $\sum_{k \in T} S_{kj} = a_j$.

Общее число единичных реализаций элементарных позиций в системе равно $\sum_{j=1}^n \sum_{k \in T} S_{kj}$.

Обозначим через S_{0j} – величину, равную максимальному значению единичных реали-

заций k -го модуля управления $\max_{k \in T} S_{kj}$; S_{00} – величину, равную максимальному значению единичных реализаций исходного, т.е. нулевого модуля управления $\max_{j=1, n} S_{0j}$.

Тогда

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k \in T} S_{kj} \leq \sum_{j=1}^n \sum_{k \in T} S_{0j} = x_0 \sum_{j=1}^n S_{0j} \leq x_0 n S_{00}.$$

Введем следующее обозначение:

$$\sum_{k \in T} \frac{S_{kj}}{S_{00}} / x_j = a_{1j}, \text{ а } \sum_{j=1}^n \frac{S_{0j}}{S_{00}} = \alpha.$$

Тогда критерием трудоемкости должен стать минимум времени производства монтажных работ:

$$\varphi_1(X) = \sum_{j=1}^n a_{1j} x_j \leq b_1. \quad (3)$$

Плановая трудоемкость b_2 должна стать ограничением трудоемкости эксплуатации навесных фасадов:

$$\varphi_2(X) = \sum_{j=1}^n a_{2j} x_j \leq b_2. \quad (4)$$

Ограничения бюджета управляющей организации b_3 лимитируют стоимость работ:

$$\varphi_3(X) = \sum_{j=1}^n a_{3j} x_j \leq b_3. \quad (5)$$

Минимизация затрат на эксплуатацию СЭМ b_4 определяет экономическую эффективность системы управления техническим состоянием объекта недвижимости:

$$\varphi_4(X) = \sum_{j=1}^n a_{4j} x_j \leq b_4. \quad (6)$$

Некоторая величина b_5 нормирует и ограничивает количество дефектов, повреждений, отказов СЭМ:

$$\varphi_5(X) = \sum_{j=1}^n a_{5j} x_j \leq b_5. \quad (7)$$

Наработка на отказ СЭМ должна стремиться к максимальному времени и минимальному времени восстановления b_6 :

$$\varphi_6(X) = \sum_{j=1}^n a_{6j} x_j \leq b_6. \quad (8)$$

В нашем исследовании показателем $\varphi_7(X)$ опишем достоверность принимаемых решений. Через a_{7j} обозначим коэффициенты выпуклой линейной комбинации ($a_{7j} \geq 0$):

$$\varphi_7(X) = \sum_{j=1}^n a_{7j} \varphi_{7j}(x_j). \quad (9)$$

В целом надежность СЭМ определим как

$$\varphi_8(X) = \sum_{j=1}^n a_{8j} \varphi_{8j}(x_j); \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{1j} x_j \leq \alpha x_0, \quad (11)$$

где $1 \leq \alpha \leq n$.

Приведенные выше показатели оценки качества управления техническим состоянием СЭМ являются случайными величинами. Их вероятностная оценка приведена на рис. 2.

Для принятия решений о величине данных показателей можно использовать известный в теории подход, основанный на зонах «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «не-

удовлетворительно» функции желательности Харрингтона.

Таким образом, предложенный подход к управлению техническим состоянием многослойных ограждающих конструкций зданий позволяет повысить их долговечность. Контроль каждого из приведенных выше показателей при эксплуатации по признаку превышения значения, задаваемого либо требованиями СНиП, либо принятыми ограничениями, позволяет принимать своевременные решения по устранению технических проблем. Оценка надежности системы с вероятностью того, что все показатели находятся в зонах допуска, а обратная величина является мерой риска пре-

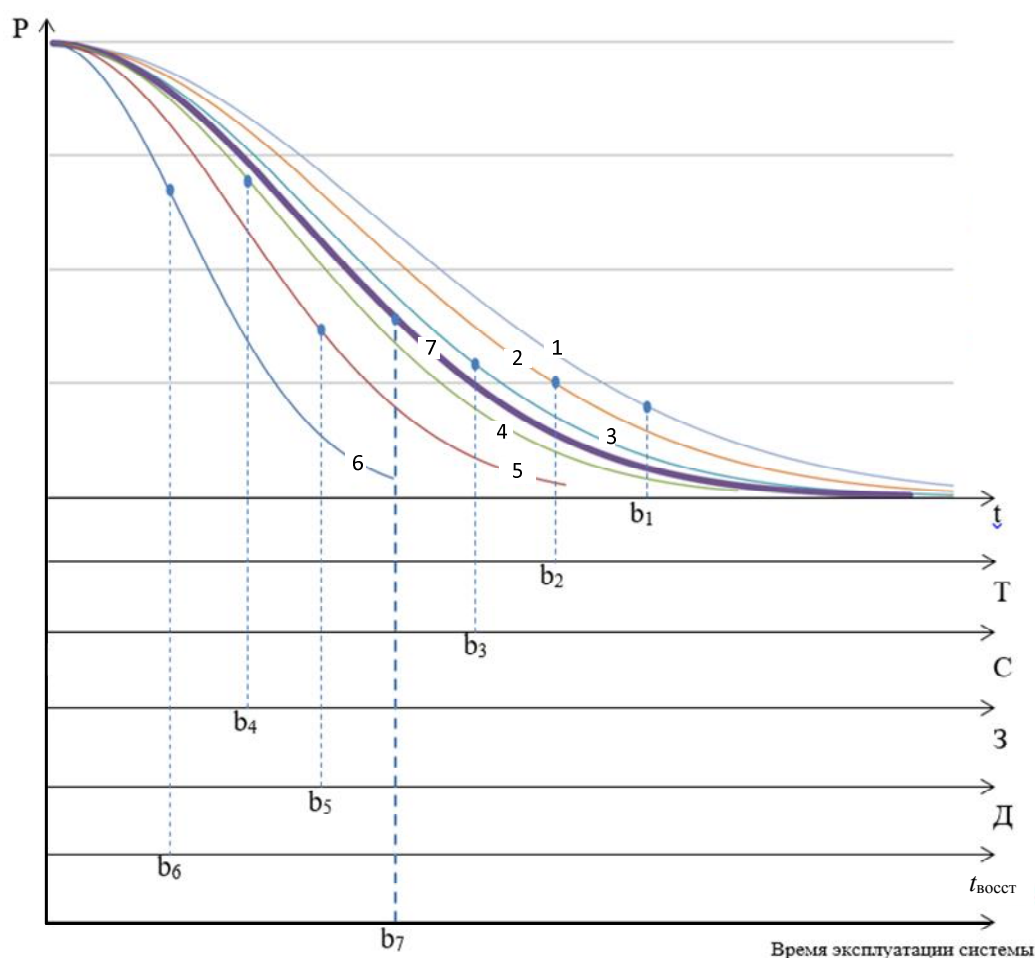


Рис. 2. Вероятности распределения показателей СЭМ:

1 – вероятность выполнения монтажных работ в заданные сроки; 2 – вероятность того, что трудоемкость эксплуатации не будет превышать заданную; 3 – вероятность того, что сметная стоимость не превышает бюджет управляющей компании; 4 – вероятность того, что затраты не превысят лимиты; 5 – вероятность того, что количество дефектов СЭМ не превысит заданного значения; 6 – вероятность того, что время восстановления не превысит нормативного или планового значения; 7 – время эксплуатации системы; t – время выполнения монтажных работ;

T – трудоемкость; C – сметная стоимость; Z – затраты; D – количество дефектов СЭМ;

$t_{\text{восст}}$ – время восстановления

вышения принятого допуска по каждому показателю и системы в целом, позволят планировать экономические и технические ресурсы

для поддержания многослойных ограждающих конструкций в рабочем состоянии.

Библиографический список

1. Горшков А.С., Кнатько М.В., Рымкевич П.П. Оценка долговечности ограждающих конструкций зданий // СтройПРОФИль. 2009. № 3. С. 7–8.
2. Корниенко С.В. Комплексная оценка энергоэффективности и тепловой защиты зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 11 (26). С. 33–48.
3. Воробьев В.С., Баишеев Н.В. Организационно-технологические решения монтажа фасадных систем с вентилируемым воздушным зазором // Актуальные проблемы Транссиба на современном этапе. Кадровое и научно-техническое обеспечение процессов интеграции в мировую транспортную систему: Междунар. науч.-практ. конф., посвященная 75-летию Сибирского государственного университета путей сообщения. Новосибирск, 2007. С. 305–306.
4. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Требования к теплозащите и энергетической эффективности в проекте актуализированного СНиП «Тепловая защита зданий» // Жилищное строительство. 2011. № 8. С. 2–6.
5. Жадановский Б.В., Кужин М.Ф. Организационно-технологические решения устройства навесных фасадных систем при реконструкции жилых и общественных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 1. С. 62–64.
6. Запашикова Н.П. Основные подходы к исследованию надежности навесных вентилируемых фасадов в домостроении в условиях Сибири // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 1–2. С. 153–155.
7. Воробьев В.С., Запашикова Н.П. Оценка долговечности многослойных ограждающих конструкций // Современная наука: теоретический и практический взгляд: Сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. (15 августа 2014 г.). Уфа: АЭТЕРНА, 2014. С. 15–17.
8. Запашикова Н.П. Оценка надежности ограждающих конструкций зданий методами физического и вероятностного моделирования // Науковедение: интернет-журнал. 2014. № 5 (24). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/76TVN514.pdf> (дата обращения: 10.03.2017).
9. Воробьев В.С., Запашикова Н.П. Оценка технического состояния навесных фасадных систем как инструмент энергосбережения и повышения энергетической эффективности зданий // Науковедение: интернет-журнал. 2015. № 3 (28). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/99TVN315.pdf> (дата обращения: 10.03.2017).
10. Запашикова Н.П. Оценка качества управления техническим состоянием объекта недвижимости // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 3. С. 21–23.
11. Снегирев А.А., Илюхин А.А. Оценка качества функционирования системы управления с учетом числа состояний отказов ее элементов // Надежность. 2011. № 4. С. 42–46.

V.S. Vorobyov, N.P. Zapashikova, A.S. Sinitsyna

Methodical Approaches to Managing the Technical State of Multi-Layer Building Envelopes

Abstract. During the operation of buildings with multi-layered enclosing structures, including hinged ventilated facades (IAF), one of the indicators determining the longevity of the latter is the reliability of their elements, technologies and the quality of construction and installation works. The approach to the extension of the life cycle of buildings by increasing the service life of the hinged ventilated facades due to the creation of a technical state management system based on the multicriteria evaluation of technical and economic parameters, mathematical modeling of reliability and durability of the IAF elements, the development of innovative design solutions and technologies, State IAF.

A probabilistic model of multilayer enclosing structures elements wear has been developed, which makes it possible to estimate their longevity.

A new category for the construction industry was introduced and substantiated: the "construction and operation module" (SEM), understood as the aggregate of the load-bearing part of the building and the multi-layered enclosing structure whose geometric dimensions coincide with the surface of the inner vertical part of the wall.

The definition of system complexity as a combination of the SEM number and types of constructive elements is substantiated.

The quantitative and qualitative criteria of management efficiency of the technical condition of the hinged ventilated facades are substantiated. The nature of the change in the likelihood of the fact that the SEM estimates will not exceed allowable values is established.

The measures of management of the technical condition of the hinged facades are proposed, which consist in the control and monitoring of EMS, which allow identifying failures and pre-failure states, which is the basis for planning their repairs or replacement with new elements.

Key words: *hinged ventilated facade; wear; energy efficiency; durability; construction and operation module.*

Воробьев Валерий Степанович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология, организация и экономика строительства» СГУПС. E-mail: Vorobjev@stu.ru

Запашикова Наталья Петровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология, организация и экономика строительства» СГУПС. E-mail: znp76@mail.ru

Синицына Анастасия Сергеевна – аспирант кафедры «Технология, организация и экономика строительства» СГУПС. E-mail: Anastasu-Sinicyna@yandex.ru