

EDN: RSPANU

УДК 624.012.4

**В. Н. ЛЕВЧЕНКО, Е. А. ДМИТРЕНКО, А. А. ХРАМОГИН, И. А. ОЛЕЙНИК**  
ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,  
Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, г. о. Макеевка, г. Макеевка

## **ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ СТРОИТЕЛЬСТВА И РЕКОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

**Аннотация.** Экономическая оценка надёжности строительных конструкций - сложная комплексная задача; она должна решаться с учётом затрат, направленных на обеспечение требуемых показателей качества в процессе проектирования, возведения, эксплуатации и реконструкции зданий и сооружений. Последнее особенно важно, так как, в отличие от машин, приборов и других изделий промышленного производства, строительные объекты, как правило, рассчитываются на длительные сроки службы. В статье приводятся пути получения равнонадёжных конструкций при их проектировании, показано как производится технологическое обеспечение надёжности конструкций и чем обеспечивается надёжность в процессе эксплуатации конструкций. Приведены необходимые технологические предпосылки и практические рекомендации, на основании которых могут быть сделаны важные шаги по пути надёжного улучшения качества строительства при одновременном уменьшении его стоимости.

**Ключевые слова:** надёжность, деформативность, долговечность, вероятностная оценка, ремонтпригодность, реконструкция.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Основной экономический эффект надёжности строительных конструкций определяется на стадии проектирования. Здесь, прежде всего, должен быть установлен необходимый уровень надёжности, в зависимости от функционального назначения и требуемого срока его службы. Применительно к этому уровню выбираются материалы несущих и ограждающих конструкций.

Затем, задача сводится к проектированию равнонадёжных конструкций с требуемым уровнем надёжности, что достигается:

- выбором рациональных конструктивных решений и методов расчёта;
- выбором рациональной производственной базы и включением в проект технологически обоснованных статистических характеристик качества.

### **АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

Вопрос экономической оценки надёжности строительных конструкций очень актуален, о чём свидетельствует значительное число публикаций отечественных и зарубежных учёных, среди которых А. С. Лычёв, Л. М. Пухонто, Б. П. Расторгуев, В. Д. Райзер, В. П. Чирков, G. A. Molodchenko, I. Clanvil, P. Clifton и др.

Работы этих учёных были направлены не только на анализ факторов, влияющих на надёжность и долговечность конструкций, но и на экономическую оценку надёжности при различных стадиях строительства.

### **ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Дать оценку надёжности строительных конструкций не только на стадии проектирования, но и с учётом решения вопросов технологического обеспечения, а также в процессе их эксплуатации.



## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Низкое качество строительства неизбежно вызывает преждевременный износ и старение конструкций, что влечет за собой существенное увеличение эксплуатационных расходов [1, 2].

Принятая методика определения сметной стоимости строительства по первоначальным затратам не полностью отвечает требованиям экономики и должна быть заменена более совершенной. В самом деле, ведь объём первоначальных затрат можно сопоставить только с одной из характеристик надёжности – начальной безотказностью. В действительности не меньшее значение имеет и характеристика долговечности, позволяющая оценить качество и стоимость строительства во времени.

Рассмотрим для примера два идентичных здания, на возведение которых израсходованы одинаковые средства, но качество строительства их оказалось различным. Одно здание будет эксплуатироваться длительное время без ремонта, а другое – через короткий промежуток времени встанет на капитальный ремонт или первое здание потребует редких профилактических ремонтов, а во втором – будут сравнительно часто производиться ремонтные работы, требующие существенных материальных затрат. Иногда ущерб, наносимый низким качеством строительства, может превысить ту экономию, которая достигается строительными организациями в результате перевыполнения плана, повышения производительности труда и снижения себестоимости продукции [4].

Очевидно, что методика оценки стоимости строительства без научно обоснованного учета качества проектирования и производства работ недостаточно объективна, а иногда и вредна, ибо в отдельных случаях проектировщики идут на уменьшение (часто не существенное) сметной стоимости зданий и сооружений за счет существенного снижения уровня надёжности несущих и ограждающих конструкции, что часто влечет за собой увеличение эксплуатационных расходов.

Экономическая эффективность строительства должна оцениваться суммой затрат, производимых как во время возведения объекта, так и за весь период его эксплуатации [6]. При этом под термином «период эксплуатации» понимается срок службы объекта с момента сдачи в эксплуатацию до полного износа, или до капитального ремонта, или в период между двумя капитальными ремонтами.

Тогда стоимость объекта (конструкции), отнесённая к одному году эксплуатации, будет

$$C = \frac{C_n + \sum C_э + \sum C_y}{m}, \quad (1)$$

где  $C_n = C_б + C_д + C_p$  – стоимость первоначальных затрат на возведение здания, включая стоимость проектирования и экспериментальных работ по изучению новых технических решений;

$C_б, C_д, C_p$  – соответственно стоимость первоначальных затрат, направленных на обеспечение начальной безотказности, долговечности и ремонтпригодности;

$\sum C_э$  – сумма эксплуатационных затрат за весь период эксплуатации объекта, включая расходы на плановые профилактические осмотры и ремонты;

$\sum C_y$  – ущерб эксплуатации объекта, вызванный простоями во время проведения плановых осмотров и профилактических ремонтов;

$m$  – период эксплуатации объекта в годах.

Стоимость капитальных ремонтов не входит в выражение (1), так как после их выполнения объект должен рассматриваться как вновь возведенное здание или сооружение.

Величина  $C_n$  в (1) может быть определена по рабочим чертежам с учетом проектных объемов работ.  $\sum C_э$  должна быть обоснована расчетом долговечности, устанавливающим длительность межремонтных периодов и объем профилактических ремонтов, а  $\sum C_y$  – на основании фактической стоимости простоя в единицу времени с учетом длительности и количества текущих ремонтов.

Экономическая эффективность проектирования, возведения и эксплуатации строительных конструкций с учетом их надёжности может быть оценена по формуле (1). При этом функциональная взаимосвязь экономических и технических характеристик надёжности несущих и ограждающих конструкций будет

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{E}_б &= F_1(\mathcal{E}_{тб}, \mathcal{E}_{пб}) \\ \mathcal{E}_д &= F_2(\mathcal{E}_т, \mathcal{E}_{эд}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\mathcal{E}_б$  – экономическая характеристика действительной (натурной) начальной безотказности;  
 $\mathcal{E}_{тб}$  – экономическая характеристика теоретической проектной начальной безотказности;

- $\mathcal{E}_{\text{нб}}$  – экономическая характеристика производственных затрат, направленных на обеспечение проектной начальной безотказности;
- $\mathcal{E}_{\text{д}}$  – экономическая характеристика действительной (натурной) долговечности);
- $\mathcal{E}_{\text{т}}$  – экономическая характеристика теоретической (проектной) долговечности с учётом ремонтпригодности элементов и узлов конструкции;
- $\mathcal{E}_{\text{эд}}$  – экономическая характеристика эксплуатационных затрат, направленных на обеспечение проектной долговечности;
- $F_1, F_2$  – функциональные показатели начальной безотказности и долговечности строительных конструкций.

Сейчас чрезвычайно трудно привести численные показатели экономической эффективности строительных конструкций с учетом их качества. Однако можно с уверенностью сказать, что экономический оптимум в каждом конкретном случае должен быть найден при условии возведения несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений с гарантированным уровнем надежности, обеспечивающим их безопасную эксплуатацию, и спроектированных с минимальным допустимым коэффициентом надежности.

Основной экономический эффект надежности строительных конструкций определяется на стадии проектирования. Здесь, прежде всего, должен быть установлен необходимый уровень надежности в зависимости от функционального назначения объекта и требуемого срока его службы. Применительно к этому уровню выбираются материалы несущих и ограждающих конструкций [3, 5].

Затем задача сводится к проектированию равнонадёжной конструкции с требуемым уровнем надежности, что достигается:

- выбором рациональных конструктивных решений и методов расчета;
- выбором рациональной производственной базы и включением в проект технологически обоснованных статистических характеристик качества.

Повышение уровня теоретической надежности, снижение расчетного коэффициента запаса и, следовательно, уменьшение затрат на возведение зданий, и сооружений может быть достигнуто за счет:

- максимального (с учетом возможностей производственной базы) укрупнения элементов сборных конструкций и соответственного уменьшения числа их сопряжений;
- создания конструктивных схем, обеспечивающих резервирование надежности, т. е. таких схем, при которых отказ, одного или даже нескольких элементов не означал бы отказа всей конструкции;
- применения пространственных конструкций;
- максимального использования стандартных и унифицированных элементов, которые, как правило, изготавливаются по более совершенной технологии и имеют высокий уровень надежности;
- применения элементов железобетонных конструкций с учетом их контрольной (конструктивной) прочности;
- расположения однотипных элементов сборных конструкций, имеющих разные характеристики начальной безотказности в расчетных участках конструктивно-монтажных цепей таким образом, чтобы обеспечить приблизительно равный уровень надежности во всех звеньях конструкции;
- проектирования узлов сопряжений с характеристиками надежности, близкими к соответствующим характеристикам элементов;
- применения монолитных конструкций. Заметим, что, несмотря на то, что эти конструкции в силу однородности материала, элементов и узлов должны быть более надежными, они обладают одним существенным недостатком: при их возведении труднее управлять качеством, так как невозможно, обеспечить равнонадёжность конструкции путем рационального размещения в ней элементов с разными уровнями надежности и учесть их конструкционную прочность;
- обеспечения технологичности конструкций и рабочих чертежей. Это требование обуславливается созданием конструкций, приспособленных для рациональной организации изготовительных, строительного-монтажных и ремонтных работ с учетом пооперационного предупредительного контроля качества.

Непременным условием уменьшения расчетного коэффициента надежности при заданном уровне надежности конструкции является получение надлежащих гарантий в том, что действительные характеристики качества (надежности) возведенной в натуре конструкции будут соответствовать расчетной модели [8]. Как уже было сказано, эта задача решается путем организации активного производственного контроля качества и стабилизации технологических процессов, что связано с некоторыми материальными затратами. Однако эти затраты окупаются за счет снижения расчетного коэффициента надежности и удлинения срока службы конструкции.

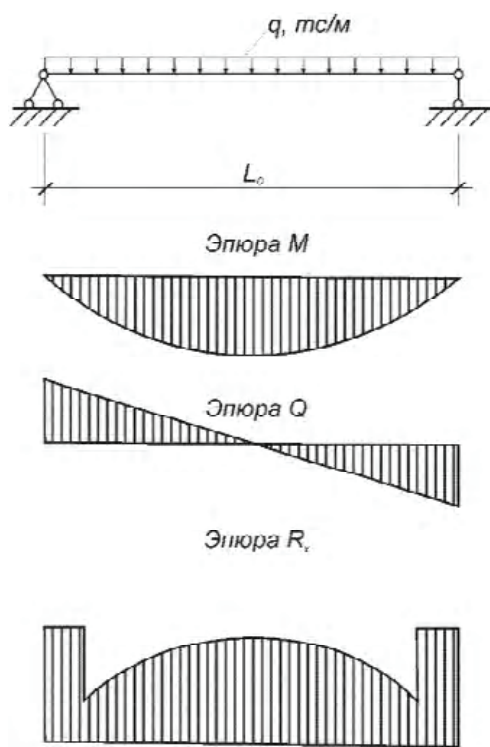
В железобетонных конструкциях имеются еще и дополнительные резервы экономии:

1. Повышение коэффициента однородности бетона и уменьшение коэффициента перегрузки от собственного веса, что позволяет уменьшить расчетные сечения.

2. Оценка физико-механических характеристик качества элементов железобетонных конструкций до их контрольной (конструкционной) прочности. Сущность метода заключается в том, что на основе сплошного контроля готовой продукции неразрушающими методами определяются фактические (контрольные) значения физико-механических характеристик качества в различных сечениях элементов, которые сопоставляются с расчетными усилиями, действующими в этих сечениях, и по результатам этого сопоставления определяется пригодность продукции.

Как известно, по принятой методике расчета железобетонных конструкций проектом устанавливается один класс бетона для всего элемента (например, балки), а величина сечения, обычно принимаемая постоянной по длине балки, назначается по максимальному усилию. Естественно, что прочность, необходимая в расчетном сечении, оказывается излишней для других сечений. В силу особенностей технологии производства железобетонных конструкций имеет место изменчивость характеристик, прочности в пределах элемента. Задача состоит в том, чтобы учесть вероятность совпадения действительных характеристик прочности в некоторых сечениях с расчетными усилиями, действующими в этих сечениях.

Ранее была предложена методика вероятностной оценки этих совпадений, позволяющая уменьшить расчетный класс бетона (или, что тоже, расчетный коэффициент надежности), и получить существенный экономический эффект [4].



**Рисунок 1** – Расчетные и контрольные эпюры для однопролетной железобетонной балки.

уровня надёжности, и, следовательно, на улучшение технико-экономических показателей производства.

Задача службы эксплуатации строительных конструкций в конечном счёте сводится к поддержанию заданного уровня их надёжности в течение всего срока службы. С повышением уровня надёжности возрастают капитальные затраты, связанные с их возведением, а затраты на эксплуатацию, соответственно уменьшаются. Во временных сооружениях, рассчитанных на короткий срок службы, затраты на эксплуатацию могут оказаться близкими к нулю. В зданиях высокого класса, рассчитанных на длительный период эксплуатации, эти расходы составляют существенную часть общей стоимости строительства. Экономическая эффективность затрат на проведение профилактических

Так, например, для сопоставления действительных характеристик прочности бетона однопролетной железобетонной балки (рис. 1) с сопротивлениями, допускаемыми по расчету для различных её сечений, строится специальная контрольная эпюра  $R_x$ . Ординаты этой огибающей эпюры определены по результатам расчета бетона на сжимающие усилия от действующих моментов, а также сжимающие или перерезывающие усилия от поперечных сил при условии восприятия арматурой действующих усилий и обеспечения надежного ее сцепления с бетоном. Расчеты выполнены с учетом изменения величин изгибающих моментов и перерезывающих сил по длине балки (эпюры  $M$  и  $Q$ ).

При сплошном контроле прочности бетона в изделиях для каждого контролируемого сечения элемента должно быть соблюдено условие:

$$R_{изм} \leq R_x,$$

где  $R_{изм}$  – действительная (измеренная) прочность бетона в контролируемом сечении элемента;

$R_x$  – расчётное сопротивление бетона в том же сечении;

3. Улучшение качества строительства, сведение к минимуму доли дефектной продукции и удлинение межремонтного периода.

4. Осуществление рекомендаций службы надёжности по совершенствованию проектных решений и технологических процессов производства, направленных на повышение

осмотров и ремонтов может быть оценена путем сопоставления этих затрат с первоначальной стоимостью строительства [9, 10].

Как известно периодичность профилактических ремонтов зависит от интенсивности постепенного износа элементов и узлов конструкции. Интенсивность износа в свою очередь зависит от качества материалов, совершенства конструктивных решений, степени воздействия внешней среды и условий эксплуатации конструкции. Последние определяются уровнем ее ремонтпригодности и организацией эксплуатационной службы. В отдельных случаях (например, при работе в агрессивных средах) высокий уровень ремонтпригодности и надежная эксплуатация позволят свести к минимуму расчетный коэффициент условий работы.

Объем работ, стоимость выполнения плановых текущих ремонтов и их количество за весь период эксплуатации должны определяться на стадии проектирования объекта, и могут быть определены по формуле

$$C'_3 = C''_3 \cdot n, \quad (4)$$

где  $C'_3$  – сумма затрат на проведение профилактических ремонтов;  
 $C''_3$  – средняя стоимость одного профилактического ремонта;  
 $n$  – количество профилактических ремонтов за весь срок службы конструкции.

Таким образом, служба эксплуатации, организуемая применительно к функциональным особенностям здания или сооружения и степени его ремонтпригодности, является регулятором долговечности конструкции. Расходы на ее содержание (жилищно-эксплуатационные конторы, ремонтно-строительные цехи предприятий, инженерная служба общественных зданий и т. п.) компенсируются экономией, достигаемой за счет увеличения срока службы объекта.

В процессе эксплуатации первоначальная стоимость конструкций и оборудования из-за износа и старения уменьшается (рис. 2). При назначении периодичности выполнения плановых ремонтно-восстановительных работ желательно максимально использовать ресурс элементов здания. Кроме того, при выполнении планово-предупредительных ремонтов технологических групп оборудования остаточный ресурс является критерием выбраковки элементов. При устранении неисправностей аварийного характера остаточный ресурс является одним из основных факторов для определения степени восстановления – минимальное восстановление или замена конструкции или оборудования. В любом случае определение остаточного ресурса связано с экономическим обоснованием проведения эксплуатационных мероприятий.

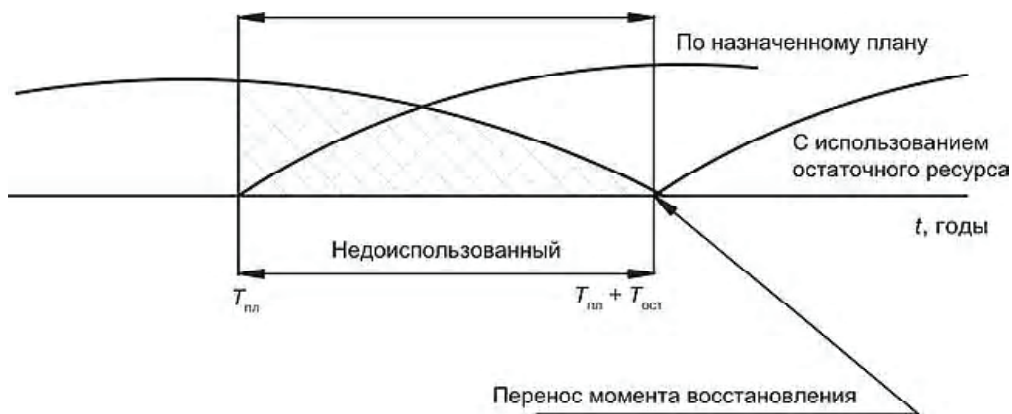


Рисунок 2 – Остаточный ресурс конструкции.

Конструкции и оборудование зданий независимо от стадий строительства и времени эксплуатации обладают остаточной стоимостью  $C_{ост}$ , которая изменяется пропорционально наработке и рассчитывается по формуле:

$$C_{ост} = C_{нач} \frac{T_{ост}}{T_{ср}}, \quad (5)$$

где  $T_{ср}$  – средний срок службы конструкции;  
 $T_{ост}$  – остаточный срок службы;

$C_{нач}$  – первоначальная стоимость конструкции.

Для некоторых элементов здания остаточная стоимость может быть определена в зависимости от соотношения назначенного периода проведения плановых ремонтов  $T_{пл}$  и среднего срока службы элемента  $T_{ср}$  по формуле

$$C_{ост} = C_{нач} \cdot k_{ост},$$

где  $k_{ост}$  – коэффициент для определения остаточного ресурса конструкции, определяемый по таблицам в зависимости от соотношения  $T_{пл}$  и  $T_{ср}$ .

## ВЫВОДЫ

Предложена методика определения экономической эффективности проектирования, возведения и эксплуатации строительных конструкций с учетом их надежности, т. е. с учетом затрат, направленных на обеспечение требуемых показателей качества в процессе проектирования, возведения, и эксплуатации зданий и сооружений.

Рекомендован порядок решения задачи проектирования равнонадежной конструкции с требуемым уровнем надежности.

Предложен вариант окупаемости материальных затрат производства различных строительных конструкций за счёт снижения расчётного коэффициента надёжности и удлинения срока службы конструкции.

Кроме этого, предложены ещё и дополнительные резервы экономии, за счёт:

- повышение коэффициента однородности бетона и уменьшения коэффициента перегрузки (коэффициента надёжности по нагрузке) от собственного веса;
- оценки физико-механических характеристик качества элементов железобетонных конструкций по их контрольной (конструкционной) прочности;
- применения селективного отбор при сплошном контроле физико-механических и геометрических характеристик качества.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лычев, А. С. Надёжность строительных конструкций : учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению 653500 «Строительство» / А. С. Лычев. – Москва : Ассоциация строительных вузов, 2008. – 174 с. – Текст : непосредственный.
2. Лычев, А. С. Оценка нижней границы области вероятностно-экономической оптимизации строительных конструкций / А. С. Лычев. – Текст : непосредственный // Известия ВУЗов. Строительство. – 1994. – № 2. – С. 101–103.
3. Пухонто, Л. М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений (силосов, бункеров, резервуаров, водонапорных башен, подпорных стен) / Л. М. Пухонто. – Москва : Издательство АСВ, 2004. – 419 с. – Текст : непосредственный.
4. Райзер, В. Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций / В. Д. Райзер. – Москва : Стройиздат, 1995. – 352 с. – Текст : непосредственный.
5. Рекомендации по обеспечению надежности и долговечности железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений при их реконструкции и восстановлении / Харьковский Промстройиниипроект. – Москва : Стройиздат, 1990. – 176 с. – Текст : непосредственный.
6. Руководство по определению экономической эффективности повышения качества и долговечности строительных конструкций / НИИЖБ Госстроя СССР. – Москва : Стройиздат, 1981 – 56 с. – Текст : непосредственный.
7. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения : утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 19 декабря 2018 г. : актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 : дата введения 2019-06-20 / ЦНИИПромзданий. – Москва : [б. и.], 2019. – Текст : непосредственный.
8. Чирков, В. П. Надёжность и долговечность железобетонных конструкций зданий и сооружений / В. П. Чирков. – Текст : непосредственный // Российская архитектурно-строительная энциклопедия. – 1998. – Том V. – С. 86–177.
9. Clanvil, I. Prediction of Concrete Durability / I. Clanvil, A. Neville, G. Sommerville. – London : EFN Spon, 1996. – 208 p. – Текст : непосредственный.
10. Economic effects of metallic corrosion in the United States Part I / L. H. Bennett, J. Kruger, R. L. Parker [et al.]. – Текст : непосредственный // A report to the Congress by the National Bureau of Standards. – 1978. – Volume NBS Special Publication 511-1. – Publisher : National Bureau of Standards (U. S.). – 72 p.

Получена 08.01.2024

Принята 26.01.2024

VICTOR LEVCHENKO, EVGENIY DMITRENKO, ALEKSANDR KHRAMOGIN,  
IRINA OLEINIK  
ECONOMIC ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF BUILDING  
STRUCTURES AT VARIOUS STAGES OF CONSTRUCTION AND  
RECONSTRUCTION OF BUILDINGS AND STRUCTURES  
FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture», Russian  
Federation, Donetsk People's Republic, Makeevka

**Abstract.** The economic assessment of the reliability of building structures is a hard and complex task; it must be solved while taking into account the costs aimed at ensuring the required quality indicators in the process of designing, constructing, maintaining and reconstructing buildings and structures. The latter is especially important, since, unlike machines, appliances and other industrial products, construction facilities are usually designed for long service lives. The article provides ways to obtain equally reliable structures during their design, shows how technological support for the reliability of structures is carried out and how reliability is ensured during the operation of structures. The necessary technological prerequisites and practical recommendations are given, on the basis of which important steps can be taken towards reliable improvement of the quality of construction while reducing its cost.

**Keywords:** reliability, deformability, durability, probabilistic evaluation, maintainability, reconstruction.

**Левченко Виктор Николаевич** – кандидат технических наук; профессор; заведующий кафедрой железобетонных конструкций ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: проектирование экономичных строительных конструкций и разработка оптимальных конструктивных и объемно-планировочных решений промышленных зданий и инженерных сооружений.

**Дмитренко Евгений Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных конструкций ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: развитие методик определения характеристик напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов при сложных режимах силового и температурного воздействий, оценка технического состояния и проектирование железобетонных конструкций.

**Храмогин Александр Андреевич** – ассистент кафедры железобетонных конструкций ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: развитие методик определения характеристик напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов при сложных режимах силового и температурного воздействий.

**Олейник Ирина Андреевна** – магистрант ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: проектирование экономичных строительных конструкций и разработка оптимальных конструктивных и объемно-планировочных решений промышленных зданий и инженерных сооружений.

**Levchenko Victor** – Ph. D (Eng.); Professor, Head Reinforced Concrete Constructions Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: economically attractive building structures design and developing the structural and spatial designs of industrial buildings and engineering structures.

**Dmitrenko Evgeniy** – Ph. D., Associate Professor, Reinforced Concrete Constructions Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: development of methods of estimation of characteristics of the stress-strain state of reinforced concrete elements under complex modes of power and temperature influences, estimation of technical state and design of reinforced concrete constructions.

**Khramogin Aleksandr** – assistant, Reinforced Concrete Constructions Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: development of methods of estimation of characteristics of the stress-strain state of reinforced concrete elements under complex modes of power and temperature influences

**Oleinik Irina** – master's student, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: economically attractive building structures design and developing the structural and spatial designs of industrial buildings and engineering structures.