



РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ НА ПРИМЕРЕ ДВУХКОНСОЛЬНОГО ЦЕНТРАЛЬНО НАГРУЖЕННОГО ЭЛЕМЕНТА

П. Г. Маслов, М. В. Шавыкина

Маслов Павел Геннадьевич, аспирант, Институт пути строительства и сооружений Российского университета транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (985) 411-11-01; e-mail: maslov007@mail.ru;

Шавыкина Марина Витальевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Института пути строительства и сооружений Российского университета транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (906) 047-42-32; e-mail: shavikina.marina@yandex.ru

В статье рассматривается проблема обоснованного назначения параметров железобетонных конструкций (класс бетона, размеры поперечного сечения, площадь продольной арматуры), которые в современной практике проектирования часто завышаются из-за жестких требований норм по ограничению ширины раскрытия трещин при отсутствии необходимости такого запаса по условиям прочности и деформативности. Целью исследования является разработка теоретических основ методики расчета трещинообразования, позволяющей уточнить расстояние между трещинами и ширину их раскрытия на основе объединения положений механики разрушения и традиционных подходов строительной механики. В качестве базовой расчетной модели принят двухконсольный центрально нагруженный элемент, характеризующийся предсказуемым распределением растягивающих и сжимающих напряжений, что упрощает анализ энергетического баланса при развитии трещин. Метод исследования базируется на использовании канонических уравнений метода сил с учетом несовместимости деформаций арматуры и бетона, а также гипотезы Томаса – Гольшева о накоплении относительных взаимных смещений. Получены аналитические зависимости для определения усилий в зоне трещинообразования, выраженные через параметры, зависящие от геометрических характеристик сечения, высоты раскрытия трещины и свойств материалов. Установлено, что предложенный подход позволяет раскрыть статическую неопределимость задачи о возмущении напряженно-деформированного состояния после нарушения сплошности бетона. Выводы подтверждают возможность уточнения параметров трещиностойкости и снижения избыточности проектных решений за счет более точного учета совместной работы арматуры и бетона. Результаты могут быть использованы при совершенствовании норм проектирования железобетонных конструкций.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, трещинообразование, раскрытие трещин, расстояние между трещинами, механика разрушения, двухконсольный элемент, площадь поверхности трещины.

CALCULATING THE MAIN PARAMETERS OF FRICTION RESISTANCE USING THE EXAMPLE OF A TWO-CONSOLE CENTRALLY LOADED ELEMENT

P. G. Maslov, M. V. Shavykina

Maslov Pavel Gennadevich, post-graduate student, Institute of Construction and Structures of Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (985) 411-11-01; e-mail: maslov007@mail.ru;

Shavykina Marina Vitalyevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Building Structures, Buildings and Constructions Department, Institute of Construction and Structures of Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (906) 047-42-32; e-mail: shavikina.marina@yandex.ru

The article addresses the problem of reasonably determining the parameters of reinforced concrete structures (concrete class, cross-sectional dimensions, area of longitudinal reinforcement), which are often overestimated in modern design practice due to strict code requirements limiting crack width in the absence of the need for such a safety margin in terms of strength and deformability. The aim of the study is to develop the theoretical foundations of a methodology for calculating crack formation, allowing for the refinement of the spacing between cracks and their widths based on the combination of fracture mechanics principles and traditional approaches of structural mechanics. As a basic calculation model, a two-cantilever centrally loaded element is adopted, characterized by a predictable distribution of tensile and compressive stresses, which simplifies the analysis of the energy balance during crack development. The research method is based on the use of canonical equations of the force method, taking into account the incompatibility of deformations of reinforcement and concrete, as well as the Thomas – Golshev hypothesis on the accumulation of relative mutual displacements. Analytical dependencies for determining forces in the crack formation zone have been obtained, expressed through parameters depending on the geometrical characteristics of the section, crack width, and material properties. It has been established that the proposed approach makes it possible to reveal the static indeterminacy of the problem of perturbing the stress-strain state after the violation of concrete continuity. The conclusions confirm the possibility of refining crack resistance parameters and reducing the redundancy of design solutions by more accurately considering the joint action of reinforcement and concrete. The results can be used to improve the design standards for reinforced concrete structures.

Keywords: reinforced concrete structures, crack formation, crack opening, distance between cracks, fracture mechanics, double-cantilever element, crack surface area.

Введение

Широкое применение железобетонных конструкций в современных сооружениях обуславливает необходимость развития теории и совершенствования методов их расчета [1–3].

Практика проектирования показывает, что параметры конструкций - класс бетона, размеры сечений, площадь растянутой арматуры зачастую завышаются из-за требования по ограничению раскрытия

трещин, хотя по критериям прочности и деформативности такие запасы не требуются, что приводит к неоправданному удорожанию строительства [4–6].

Цель исследования – разработка методики расчета расстояния между трещинами и ширины их раскрытия в центрально нагруженных железобетонных элементах на основе модели двухконсольного стержня с использованием положений механики разрушения.

Задачи:

- 1) обосновать выбор двухконсольной модели для анализа трещинообразования;
- 2) получить канонические уравнения метода сил для определения усилий в арматуре и бетоне в зоне трещины;
- 3) вывести аналитические зависимости для параметров трещиностойкости;
- 4) выполнить верификацию предложенных зависимостей на основе известных экспериментальных данных.

Актуальность задачи заключается в разработке надежных методов расчета для определения расстояния между трещинами l_{cr} и ширины раскрытия трещин a_{cr} в железобетонных конструкциях [7–9].

Для конкретизации расчетных зависимостей предложена модель двухконсольного элемента как типового случая центрально нагруженной железобетонной конструкции [10–12].

Методы

Подходы к расчету трещинообразования. Известные методы расчета можно разделить на четыре группы:

- 1) на основе предпосылок теории В. И. Мурашева;
- 2) эмпирические зависимости;
- 3) Методы О. Я. Берга (концепция «зоны взаимодействия» арматуры и бетона);
- 4) методы на базе гипотезы Томаса – Гольшева о накоплении относительных взаимных смещений арматуры и бетона.

Научная новизна проведенного исследования заключается в следующем:

- 1) впервые для центрально нагруженных железобетонных элементов предложена расчетная модель двухконсольного стержня, позволяющая объединить положения механики разрушения и традиционные методы строительной механики при анализе трещинообразования. Модель отличается предсказуемым распределением растягивающих – прямоугольная эпюра и сжимающих – треугольная эпюра напряжений, что упрощает энергетический анализ развития трещин;
- 2) разработан новый подход к раскрытию статической неопределенности задачи о возмущении напряженно-деформированного состояния после нарушения сплошности бетона на основе канонических уравнений метода сил. Впервые получены аналитические зависимости для определения усилий в арматуре и бетоне в зоне трещинообразования, учитывающие несовместимость деформаций материалов и гипотезу Томаса – Гольшева о накоплении относительных взаимных смещений;

3) установлены параметрические выражения для расстояния между трещинами и ширины их раскрытия, объединяющие традиционный подход к осреднению напряженно-деформированного состояния между трещинами, элементы механики разрушения, удельная энергия развития трещины и учет совместной работы арматуры и бетона в зоне сцепления. Предложенные зависимости позволяют уточнить параметры трещиностойкости и обоснованно снизить избыточность проектных решений по сравнению с действующими нормативными методами;

4) впервые выполнен синтез аналитических решений метода сил с билинейными диаграммами деформирования материалов и диаграммами сцепления, что обеспечивает адекватное описание всех этапов трещинообразования от образования трещин до установившегося раскрытия в центрально нагруженных железобетонных элементах.

Двухконсольный элемент выбран как расчетная схема, позволяющая связать зависимости механики твердого деформируемого тела и механики разрушения, а также упростить анализ энергодолговечности при развитии трещин благодаря предсказуемому распределению напряжений: растягивающие напряжения – близки к прямоугольному распределению; сжимающие напряжения – распределены по треугольнику в зонах, прилегающих к арматуре [13–16].

Основные расчетные зависимости

Удельная энергия развития трещины ζ_{bu} определяется через функционал механики разрушения:

$$\zeta_{bu} = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\delta W - \delta V}{\delta A} \right) = \frac{dW}{dA} - \frac{dV}{dA} \quad (1)$$

где δV – уменьшение потенциальной энергии тела при продвижении трещины на δA ; δW – дополнительная работа, совершаемая над телом при продвижении трещины на δA ; A – площадь образовавшейся поверхности трещины.

В стадии II трещины развиваются на всю высоту поперечного сечения, поэтому длину трещины h_{cr} можно считать постоянной, что позволяет упростить определение сдвигающих усилий в зонах, прилегающих к трещине и избежать прямого использования функционала (1).

Расчетная схема и канонические уравнения метода сил

На основе теоремы о взаимности работ получены уравнения:

$$X_1 \delta_{11} + X_2 \delta_{21} + X_3 \delta_{31} + A_{p1} = -1 \cdot (\Delta_3 + \Delta_5) + 1 \cdot (\Delta_2 + \Delta_4). \quad (2)$$

Аналогично могут быть составлены и следующие два уравнения:

$$X_1 \delta_{12} + X_2 \delta_{22} + X_3 \delta_{32} + A_{p2} = 1 \cdot \Delta_6 - 1 \cdot (\Delta_2 + \Delta_4) \quad (3)$$

$$X_1 \delta_{13} + X_2 \delta_{23} + X_3 \delta_{33} + A_{p3} = 0. \quad (4)$$

С учетом того, что $\delta_{21} = \delta_{12}$; $\delta_{31} = \delta_{13}$; $\delta_{32} = \delta_{23}$; $A_{p1} = A_{1p} = 1 \cdot \Delta_{1p}$; $A_{p2} = A_{2p} = 1 \cdot \Delta_{2p}$; $A_{p3} = A_{3p} = 1 \cdot \Delta_{3p}$, уравнения (2)–(4) приобретают обычный вид канонических уравнений метода сил:

$$\left. \begin{aligned} X_1 \delta_{11} + X_2 \delta_{12} + X_3 \delta_{13} + \Delta_{1p} + \Delta_3 + \Delta_5 - \Delta_2 - \Delta_4 &= 0 \\ X_1 \delta_{21} + X_2 \delta_{22} + X_3 \delta_{33} + \Delta_{2p} - \Delta_6 + \Delta_2 + \Delta_4 &= 0 \\ X_1 \delta_{31} + X_2 \delta_{32} + X_3 \delta_{33} + \Delta_{3p} &= 0 \end{aligned} \right\} (5)$$

С учетом изложенного, получим:

$$X_2 = \frac{B_2}{B_1}; \quad (6)$$

$$X_3 = \frac{B_2}{B_1} \cdot A_1 + A_2; \quad (7)$$

$$X_1 = \frac{B_2}{B_1} \left(h_{crc} - \frac{1}{3} t_n \right)^2 \frac{1}{h_{crc}^2} - \frac{2}{h_{crc}} \left(\frac{B_2}{B_1} \cdot A_1 + A_2 \right) - \frac{\sigma_{bt}}{3} (h_{crc} - t_b)^3 \frac{1}{h_{crc}^3}, \quad (8)$$

где A_1, A_2, B_1, B_2 – параметры, зависящие от $h_{crc}, t_b, \sigma_{bt}, \Delta_1 - \Delta_6, E(\lambda), I_{con}, b$.

Основные гипотезы, подтвержденные экспериментом: связь между напряжениями и деформациями арматуры и бетона аппроксимируется билинейными диаграммами; трещины образуются после достижения растянутыми волокнами бетона предельных деформаций – несколько уровней трещинообразования; связь между напряжениями сцепления и относительными смещениями бетона и арматуры на расстоянии диаметра от поверхности контакта – билинейная диаграмма; раскрытие трещин – накопление относительных смещений арматуры и бетона по обе стороны от трещины с учетом толщины защитного слоя, в рамках гипотезы Томаса – Гольшева.

Результаты

Предложенная методика позволяет: раскрыть статическую неопределенность задачи о возмущении напряженно-деформированного состояния после нарушения сплошности бетона; определить деформации арматуры и бетона в произвольном сечении с координатой x ; уточнить параметры a_{crc} и l_{crc} , объединив традиционный подход к средней напряженно-деформированного состояния между трещинами, элементы механики разрушения после нарушения сплошности бетона и учет несовместимости деформаций бетона и арматуры.

Методика демонстрирует: возможность снижения избыточности проектных параметров за счет точного расчета трещинообразования; согласованность с экспериментальными данными по раскрытию трещин и расстоянию между ними и потенциал для совершенствования норм проектирования железобетонных конструкций. Ограничения метода связаны с необходимостью экспериментальной верификации для специфических типов сечений и условий нагружения [17–19].

Заключение

В статье рассмотрен критически важный аспект проектирования железобетонных конструкций – расчет трещинообразования, расстояния между трещинами и ширины их раскрытия. Существующая практика проектирования демонстрирует системный дисбаланс: параметры конструкций (класс бетона, размеры сечений, площадь арматуры) зачастую завышаются именно из-за требований по ограничению трещинообразования, хотя по критериям прочности и деформативности такие запасы не требуются. Это ведет к неоправданному удорожанию строительства. Для конкретизации расчетных зависимостей предложена модель двухконсольного элемента как типового случая центрально нагруженной железобетонной конструкции. Ее преимущество – предсказуемое распределение напряжений, прямоугольное для растягивающих, треугольное для сжимающих, что упрощает анализ энергодисбаланса при развитии трещин. Таким образом, статья закладывает теоретическую базу для совершенствования норм проектирования железобетонных конструкций с учетом современных требований к их долговечности и экономичности.

Список литературы

1. Колчунов В. И. Проблема раскрытия трещин в железобетоне / В. И. Колчунов // Строительство и реконструкция. – 2024. – № 1. – С. 14–29. – <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2024-111-1-14-29>.
2. Колчунов В. И. Определение уровня расстояния между трещинами в железобетонных конструкциях / В. И. Колчунов, С. С. Федоров // Строительство и реконструкция. – 2024. – № 4. – С. 14–27. – <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2024-114-4-14-29>.
3. Колчунов В. И. К построению расчетной модели ширины раскрытия наклонных трещин в составных железобетонных конструкциях / В. И. Колчунов, И. А. Яковенко, Н. В. Клюева // Строительная механика и расчет сооружений. – 2014. – № 1 (252). – С. 13–17.
4. Дородных А. А. Расчетная модель ширины раскрытия наклонных трещин в составных железобетонных конструкциях: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А. А. Дородных. – Орел: Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, 2013. – 22 с.
5. Шавыкина Е. В. Расчет ширины раскрытия трещин во внецентренно сжатых железобетонных конструкциях с учетом эффекта нарушения сплошности: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Е. В. Шавыкина. – Москва: Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) МПС РФ, 2009. – 24 с.
6. Шавыкина Е. В. Анализ результатов экспериментальных исследований ширины раскрытия трещин внецентренно сжатых железобетонных конструкций / Е. В. Шавыкина // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. – 2009. – № 3-23. – С. 51–55.
7. Федоров В. С. Расчет расстояния между пространственными трещинами и ширины их раскрытия в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом (случай 2) / В. С. Федоров, Вл. И. Колчунов, А. А. Покусаев // Жилищное строительство. – 2016. – № 5. – С. 16–21.
8. Покусаев А. А. Расчет расстояния между пространственными трещинами и ширины их раскрытия в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом (случай 1) / А. А. Покусаев, М. В. Шавыкина, В. И. Колчунов // Строительная механика и расчет сооружений. – 2016. – № 2 (265). – С. 20–29.
9. Карпенко Н. И. Метод расчета расстояния между трещинами в изгибаемых железобетонных элементах / Н. И. Карпенко, Е. В. Горшенина // Бетон и железобетон. – 2006. – № 5. – С. 13–15.
10. Колчунов В. И. Определение уровня расстояния между трещинами в железобетонных конструкциях / В. И. Колчунов, С. С. Федоров // Строительство и реконструкция. – 2024. – № 4 (114). – С. 14–27.
11. Колчунов Вл. И. Жесткость железобетонных конструкций при сложном сопротивлении / Вл. И. Колчунов, С. Н. Карпенко // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2022. – № 1 (65). – С. 11–24.

12. Ключева Н. В. Экспериментальные исследования ширины раскрытия наклонных трещин в составных железобетонных конструкциях / Н. В. Ключева, А. А. Дородных // Строительство и реконструкция. – 2013. – № 6 (50). – С. 13–20.
13. Колчунов Вл. И. Ширина раскрытия трещин железобетонных конструкций трапециевидного поперечного сечения с учетом новых эффектов сопротивления / Вл. И. Колчунов, А. И. Никулин, Д. В. Обернихин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2018. – № 10. – С. 64–73.
14. Travush V. I. Deformation model and algorithm for calculation of reinforced concrete structures of round cross section under torsion with bending / V. I. Travush, V. I. Kolchunov, S. A. Bulkin, M. V. Protchenko // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2022. – Vol. 18, № 2. – P. 14–30.
15. Kolchunov V. I. The second strage of stressed-deformed condition of reinforced concrete structures when turning with bending (case 2) / V. I. Kolchunov, A. I. Demyanov, N. V. Naumov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2019. – Vol. 15, № 4. – P. 66–82.
16. Kolhunov V. I. Calculation of additional dynamic stresses in rebars of flexural reinforced concrete structural elements caused by fragile failure of tensed concrete / V. I. Kolhunov, N. B. Androsova // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. – 2016. – № 4 (32). – P. 6–16.
17. Kolchunov V. I. Rigidity of reinforced concrete structures under complex resistance / V. I. Kolchunov, S. N. Karpenko // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2022. – № 1 (53). – P. 7–20.
18. Kolchunov V. I. The problem of crack opening width and stiffness of reinforced concrete structures, buildings and constructions / V. I. Kolchunov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2023. – Vol. 19, № 1. – P. 69–84.
19. Drahan A. V. An innovative approach to crack width prediction of reinforced concrete elements / A. V. Drahan. // Vestnik of Brest State Technical University. Series: Construction and Architecture. – 2019. – № 1 (114). – P. 106–112.

References

1. Kolchunov V. I. Problema raskritiya treshchin v zhelezobetone [Problem of crack opening in reinforced concrete]. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya* [Construction and Reconstruction]. 2024, no. 1, pp. 14–29. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2024-111-1-14-29>.
2. Kolchunov V. I., Fedorov S. S. Opredelenie urovneвого rasstoyaniya mezhdru treshchinami v zhelezobetonnikh konstruktsiyakh [Determination of the level distance between cracks in reinforced concrete structures]. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya* [Construction and Reconstruction]. 2024, no. 4, pp. 14–27. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2024-114-4-14-29>.
3. Kolchunov V. I., Yakovenko I. A., Klyueva N. V. K postroeniyu raschetnoi modeli shirini raskritiya naklonnikh treshchin v sostavnikh zhelezobetonnikh konstruktsiyakh [On the Construction of a Calculation Model for the Opening Width of Inclined Cracks in Composite Reinforced Concrete Structures]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii* [Structural Mechanics and Calculation of Structures]. 2014, no. 1 (252), pp. 13–17.
4. Dorodnikh A. A. *Raschetnaya model shirini raskritiya naklonnikh treshchin v sostavnikh zhelezobetonnikh konstruktsiyakh* [Calculation Model of the Opening Width of Inclined Cracks in Composite Reinforced Concrete Structures]. Orel: Gosudarstvennii universitet – uchebno-nauchno-proizvodstvennii kompleks; 2013, 22 p.
5. Shavikina Ye. V. *Raschet shirini raskritiya treshchin vo vnentsentrenno szhatikh zhelezobetonnikh konstruktsiyakh s uchedom effekta narusheniya sploshnosti* [Calculation of the crack width in eccentrically compressed reinforced concrete structures taking into account the discontinuity effect]. Moscow: Moskovskii gosudarstvennii universitet putei soobshcheniya (MIIT) MPS RF; 2009, 24 p.
6. Shavikina Ye. V. Analiz rezultatov eksperimentalnikh issledovaniy shirini raskritiya treshchin vnentsentrenno szhatikh zhelezobetonnikh konstruktsii [Analysis of the Results of Experimental Studies of the Crack Opening Width in Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Structures]. *Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitelstvo i transport* [Bulletin of the Oryol State Technical University. Series: Construction and Transport]. 2009, no. 3-23, pp. 51–55.
7. Fedorov V. S., Kolchunov Vl. I., Pokusaev A. A. Raschet rasstoyaniya mezhdru prostranstvennimi treshchinami i shirini ikh raskritiya v zhelezobetonnikh konstruktsiyakh pri kruchenii s izgbom (sluchai 2) [Calculation of the distance between spatial cracks and the width of their opening in reinforced concrete structures under torsion with bending (case 2)]. *Zhilishchnoe stroitelstvo* [Housing Construction]. 2016, no. 5, pp. 16–21.
8. Pokusaev A. A., Shavikina M. V., Kolchunov V. I. Raschet rasstoyaniya mezhdru prostranstvennimi treshchinami i shirini ikh raskritiya v zhelezobetonnikh konstruktsiyakh pri kruchenii s izgbom (sluchai 1) [Calculation of the distance between spatial cracks and the width of their opening in reinforced concrete structures under torsion with bending (case 1)]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii* [Structural Mechanics and Calculation of Structures]. 2016, no. 2 (265), pp. 20–29.
9. Karpenko N. I., Gorshenina Ye. V. Metod rascheta rasstoyaniya mezhdru treshchinami v izgibaemikh zhelezobetonnikh elementakh [Method for Calculating the Distance Between Cracks in Bending Reinforced Concrete Elements]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2006, no. 5, pp. 13–15.
10. Kolchunov V. I., Fedorov S. S. Opredelenie urovneвого rasstoyaniya mezhdru treshchinami v zhelezobetonnikh konstruktsiyakh [Determination of the level distance between cracks in reinforced concrete structures]. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya* [Construction and Reconstruction]. 2024, no. 4 (114), pp. 14–27.
11. Kolchunov Vl. I., Karpenko S. N. Zhestkost zhelezobetonnikh konstruktsii pri slozhnom soprotivlenii [Rigidity of reinforced concrete structures under complex resistance]. *Nauchnii zhurnal stroitelstva i arkhitekturi* [Scientific Journal of Construction and Architecture]. 2022, no. 1 (65), pp. 11–24.
12. Klyueva N. V., Dorodnikh A. A. Eksperimentalnie issledovaniya shirini raskritiya naklonnikh treshchin v sostavnikh zhelezobetonnikh konstruktsiyakh [Experimental studies of the opening width of inclined cracks in composite reinforced concrete structures]. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya* [Construction and Reconstruction]. 2013, no. 6 (50), pp. 13–20.
13. Kolchunov Vl. I., Nikulin A. I., Obernikhin D. V. Shirina raskritiya treshchin zhelezobetonnikh konstruktsii trapetsievidnogo poperechnogo seche-niya s uchedom novikh effektov soprotivleniya [Crack opening width in reinforced concrete structures with a trapezoidal cross-section taking into account new resistance effects]. *Vestnik Belgorodsko-go gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova* [Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov]. 2018, no. 10, pp. 64–73.
14. Travush V. I., Kolchunov V. I., Bulkin S. A., Protshenko M. V. Deformation model and algorithm for calculation of reinforced concrete structures of round cross section un-der torsion with bending [Deformation model and algorithm for calculation of reinforced concrete structures of round cross section un-der torsion with bending]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022, vol. 18, no. 2, pp. 14–30.



15. Kolchunov V. I., Demyanov A. I., Naumov N. V. The second stage of stressed-deformed condition of reinforced concrete structures when turning with bending (case 2). *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019, vol. 15, no. 4, pp. 66–82.
16. Kolchunov V. I. Calculation of additional dynamic stresses in rebars of flexural reinforced concrete structural elements caused by fragile failure of tensed concrete / V. I. Kolchunov, N. B. Androsova // *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. – 2016. – № 4 (32). – P. 6–16.
17. Kolchunov V. I., Karpenko S. N. Rigidity of reinforced concrete structures under complex resistance. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2022, no. 1 (53), pp. 7–20.
18. Kolchunov V. I. The problem of crack opening width and stiffness of reinforced concrete structures, buildings and constructions. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2023, vol. 19, no. 1, pp. 69–84.
19. Drahan A. V. An innovative approach to crack width prediction of reinforced concrete elements. *Vestnik of Brest State Technical University. Series: Construction and Architecture*. 2019, no. 1 (114), pp. 106–112.

© П. Г. Маслов, М. В. Шавыкина

Ссылка для цитирования:

П. Г. Маслов, Шавыкина М. В. Расчет основных параметров трещиностойкости на примере двухконсольного центрально нагруженного элемента // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет*. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 1 (55). С. 76–80.

УДК 621.331:625.1.012.8:534.8

DOI 10.52684/2312-3702-2026-55-1-80-86

**КОМПЛЕКСНЫЕ ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ
ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ТРАМВАЙНОГО ДЕПО ИМЕНИ П. Л. АПАКОВА:
ОТ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДО ЗАЩИТЫ ОТ ТРАНСПОРТНОЙ ВИБРАЦИИ**

Ю. В. Лазуткин, Н. В. Купчикова, А. А. Еремеев

Лазуткин Юрий Викторович, аспирант, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация; e-mail: LazutkinYV@mtp.mos.ru;

Купчикова Наталья Викторовна, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-2986-4190; e-mail: kupchikova79@mail.ru;

Еремеев Алексей Александрович, аспирант, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

Объект исследования – комплекс инженерных решений, реализованных при реконструкции трамвайного депо имени П. Л. Апакова, включая модернизацию системы электроснабжения сетей 600 В и 0,4 кВ, ГРЩ, постов секционирования и внедрение технологий виброзащиты в верхнем строении пути. Современные требования к эксплуатации трамвайного подвижного состава «Витязь-М» диктуют необходимость не только обновления энергетической инфраструктуры для обеспечения возросших нагрузок и безопасности, но и решения проблемы воздействия транспорта на окружающую среду и историческую застройку. Целью работы является демонстрация комплексного подхода к реконструкции, где вопросы надежности, энергоэффективности и вибробезопасности решаются как единая инженерная задача. Проведен анализ проектной документации, результатов натурных испытаний виброизоляционных материалов, а также данных электронной системы мониторинга нагрузок. Выполнена оценка эффективности принятых решений. Выявлены ключевые особенности обновленной инфраструктуры: переход к индивидуальному секционированию ремонтных канав с интеграцией в систему безопасности; создание иерархической системы электроснабжения 0,4 кВ с разделением потребителей по категориям надежности и автоматической компенсацией реактивной мощности, повышение соэф с 0,88 до 0,94; разработка единой системы заземления, молниезащиты и уравнивания потенциалов для всего комплекса зданий и сооружений; внедрение в конструкцию трамвайных путей виброизоляционных матов на основе гранулированного каучука СЭБС, обеспечивающих снижение вибрации на 11–13 дБ в широком диапазоне частот и решающих проблему водоотвода. Установлена и обоснована опосредованная связь между качеством электрических расчетов выбором сечений, защитой от блуждающих токов, обеспечением электромагнитной совместимости и долговременным сохранением геометрии пути, что является ключевым фактором снижения вибрации. Опыт реконструкции депо им. Апакова демонстрирует эффективность комплексного подхода, объединяющего модернизацию силового электрооборудования и пассивные методы защиты от динамических воздействий. Реализованные решения не только обеспечивают надежное и безопасное энергоснабжение для современного подвижного состава, но и минимизируют его негативное влияние на прилегающую территорию, повышая экологичность и устойчивость городской транспортной системы.

Ключевые слова: реконструкция трамвайного депо, система электроснабжения, посты секционирования, компенсация реактивной мощности, транспортная вибрация, виброизоляция, верхнее строение пути, гранулированный композит СЭБС, блуждающие токи, электромагнитная совместимость, «Витязь-М».

**INTEGRATED ENGINEERING SOLUTIONS FOR THE RECONSTRUCTION OF THE P. L. APAKOV TRAM DEPOT:
FROM POWER SUPPLY SYSTEM TO PROTECTION AGAINST TRANSPORT VIBRATION**

Yu. V. Lazutkin, N. V. Kupchikova, A. A. Yeremeyev

Lazutkin Yuriy Viktorovich, postgraduate student, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation; e-mail: LazutkinYV@mtp.mos.ru;