

Оценка несущей способности эксплуатируемых железобетонных конструкций вибрационным методом с определением положения нейтральной линии

УДК 69.059.22

DOI: <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-4-C0014>

Номер статьи: C0014

Ковалев Фёдор Евгеньевич

канд. техн. наук,

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

старший преподаватель

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 9824-8594

kovaleff81@mail.ru

Зарин Сергей Владимирович

канд. техн. наук,

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

преподаватель

Санкт-Петербург, Россия

SPIN: 9353-5456

sergeyzarin27091989@gmail.com

Селиверстов Николай Александрович

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

студент

Санкт-Петербург, Россия

seliverstovnikolay52@mail.ru

Статья получена: 04.11.2025. Одобрена: 20.11.2025. Опубликована онлайн: 25.12.2025. © РИОР

Аннотация. Целью данной статья является развитие теоретических основ оценки несущей способности конструкций с использованием вибрационного метода, установление точного значения положения нейтральной линии в процессе эксплуатации железобетонных конструкций. В ходе исследования применялись методы математического моделирования, основанного на известных теоретических выражениях, и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными. В работе рассматривались конструкции с разным уровнем несущей способности, а именно балка без дефектов, балка с небольшими трещинами и балка с магистральной трещиной. Полученные экспериментальные значения остаточной высоты сечения бетона и высоты скатой зоны достаточно точно совпадают с данными математического моделирования для этих характеристик. Полученные результаты позволяют приблизиться к решению задачи теоретического обоснования вибрационного метода обследования железобетонной конструкции, усовершенствования методов его проведения и повышения точности получаемых результатов.

Ключевые слова: несущая способность, вибрационный метод, железобетонные конструкции, дефекты.

Estimation of the load-bearing capacity of existing reinforced concrete structures by vibration method with determination of the neutral line position

Kovalev Fyodor Evgenievich

Candidate of Technical Sciences,
Military Space academy named after A.F. Mozhaisky,
Senior Lecturer
Saint Petersburg, Russia
kovaleff81@mail.ru

Sarin Sergey Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences,
Military Space academy named after A.F. Mozhaisky,
Lecturer,
Saint Petersburg, Russia
sergeyzarin27091989@gmail.com

Seliverstov Nikolai Alexandrovich

Military Space academy named after A.F. Mozhaisky,
Student
St. Petersburg, Russia
seliverstovnikolay52@mail.ru

Abstract. The objective of this article is to develop the theoretical foundations for assessing the load-bearing capacity of structures using the vibration method, to establish the exact value of the position of the neutral line during the operation of reinforced concrete structures. The following methods were used in the study: mathematical modeling based on known theoretical expressions and comparison of the obtained results with experimental data. The paper considered structures with different levels of load-bearing capacity, namely a beam without defects, a beam with small cracks, and a beam with a main crack. The obtained experimental values of the residual height of the concrete cross-section and the height of the compressed zone quite accurately coincide with the data of mathematical modeling for these characteristics. The results obtained will allow us to approach the solution of the problem of theoretical justification of the vibration method of inspection of reinforced concrete structures, improve the methods of its implementation and improve the accuracy of the results obtained.

Keywords: load-bearing capacity, vibration method, reinforced concrete structures, defects.

Широкое применение железобетонных конструкций (ЖБК) в качестве несущего остова зданий началось примерно с 60-х годов прошлого века и насчитывает более 70 лет. За столь длительный период эксплуатации в конструкциях появились дефекты различного типа. В настоящее время, одним из актуальных вопросов является вопрос оценки их технического состояния в соответствии с ГОСТ 31937-2024. Использование современных приборов неразрушающих методов контроля позволяет определять лишь физико-механические характеристики ЖБК, и потом с помощью расчётных формул оценивать их несущую способность. Одним из способов оценивания несущей способности конструкций, без применения расчётных методов, является вибрационный метод [1-3].

Для теоретического обоснования вибрационного метода неразрушающего контроля железобетонных конструкций [1, 4], путем измерения частот колебаний и геометрических параметров конструкции необходимо точно понимать в какой степени в работе данной ЖБК

задействованы ее элементы. Какая доля нагрузки приходится на бетон, а какая на арматуру?

Ключевым параметром для определения этих соотношений является положение нейтральной линии сечения, или высота сжатой зоны бетона x [3,5]. Расчеты этого параметра, согласно нормативной документации, позволяют рассчитать значение нейтральной линии для состояния близкого к разрушению конструкции, что не приемлемо для целей диагностики.

Согласно СП 63.13330.2018 пространственная жесткость железобетонной балки определяется по формуле:

$$D = k_b \cdot E_b \cdot I + k_s \cdot E_s \cdot I_s, \quad (1)$$

где E_b — модуль упругости бетона;

E_s — модуль упругости арматуры;

I — момент инерции полного сечения;

I_s — момент инерции всей продольной арматуры в сечении;

k_b — безразмерный коэффициент для бетона, вычисляемый по формуле:

$$k_b = \frac{0,15}{\phi_1 \cdot (0,3 + \delta_e)},$$

где ϕ_1 — коэффициент, учитывающий влияние длительности действия нагрузки;

δ_e — относительное значение эксцентричности;

$k_s = 0,7$ — коэффициент для арматуры.

Запишем уравнение жесткости сечения железобетонной балки относительно уровня нейтрального слоя, так как поворот сечения осуществляется именно относительно этой линии.

$$I(x) = \frac{b}{3} \cdot (x^3 + [(h_0 - \delta) - x]^3), \quad (2)$$

$$I_s(x) = I_{sc} + I_s + A'_s(x - a')^2 + A_s(h_0 - x)^2, \quad (3)$$

где x — высота сжатой зоны;

δ — глубина трещины;

b — ширина сечения;

h_0 — рабочая высота бетона;

I_{sc}, I_s — моменты инерции относительно своих центров тяжести сжатой и растянутой арматуры соответственно;

A'_s, A_s — расчетные площади сжатой и растянутой арматуры соответственно.

Значения I_{sc}, I_s принебрежимо малы в сравнении с остальными слагаемыми, поэтому приравняем их к нулю и в дальнейших расчетах рассматривать не будем.

Подставив выражения (2), (3) в исходное выражение (1) получаем формулу для оценки жесткости железобетонной балки в зависимости от положения нейтрального слоя или высоты сжатой зоны бетона:

$$D = k_b E_b \frac{b}{3} \cdot (x^3 + [(h_0 - \delta) - x]^3) + \\ + k_s E_s (A'_s(x - a')^2 + A_s(h_0 - x)^2), \quad (4)$$

Для удобства записи введем коэффициенты a_1, a_2, a_3 :

$$a_1 = k_b E_b b (h_0 - \delta) + k_s E_s (A'_s + A_s), \quad (5)$$

$$a_2 = k_b E_b b (h_0 - \delta)^2 + k_s E_s (A'_s a' + A_s h'_0), \quad (6)$$

$$a_3 = \frac{k_b E_b b (h_0 - \delta)^3}{3} + k_s E_s (A'_s a'^2 + A_s h_0'^2). \quad (7)$$

Конечное уравнение запишем в виде:

$$D = a_1 x^2 - a_2 x + a_3. \quad (8)$$

Для примера возьмём железобетонную балку 1ПБ-10-1П, характеристики которой представлены в Таблице 1. Схема загружения и сечение балки представлено на Рис. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1
Оценка эффективности компонентов добавки

Марка	Размеры, мм										Масса, кг	$E_s, МПа$	$E_b, МПа$
	L	L_0	b	b'	h	h_0	a	a'	d	δ			
1ПБ-10-1П	1030	930	120	80	65	53	12	18	4	Var(0 ... h0)	20	3×10^4	2×10^5

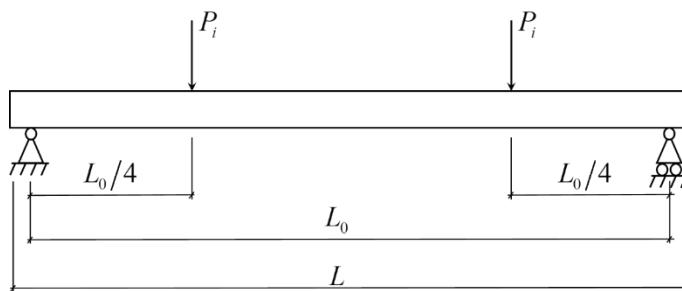


Рис. 1. Расчетная схема балки 1 ПБ-10-1П

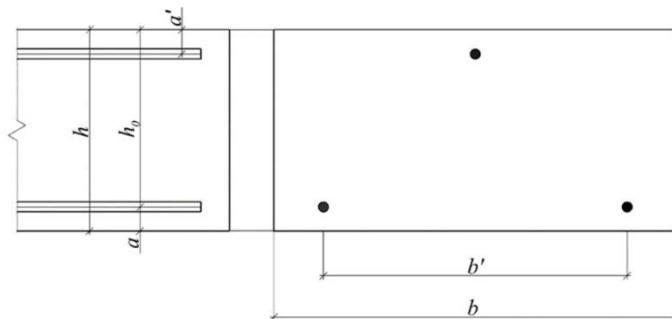


Рис. 2. Сечение балки 1 ПБ-10-1П

Применим уравнение (8) к исходной балке и определим те состояния, в которых жесткость достигает своих минимальных/максимальных значений и не может выходить за отведенные границы.

Уравнение (8) является квадратным, график которого представляет собой параболу, ветви которой направлены вверх, а вершина имеет координаты (m, n) , где

$$m = -\frac{-a_2}{2 \cdot a_1}, \quad (9)$$

$$n = -\frac{a_2^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3}{4 \cdot a_1}, \quad (10)$$

Необходимо найти экстремумы функции $D(x, \delta)$. Принимая во внимание, что высота сжатой зоны x не может быть больше остаточной высоты бетонного сечения построим графики $X_{min}(\delta) = m(\delta)$, $X_{max}(\delta) = h_0 - \delta$ (Рис. 3). Превалирующим условием является условие максимума, второстепенным – условие минимума. Таким образом, высота сжатой зоны должна находиться в выделенной области графика в любом состоянии балки.

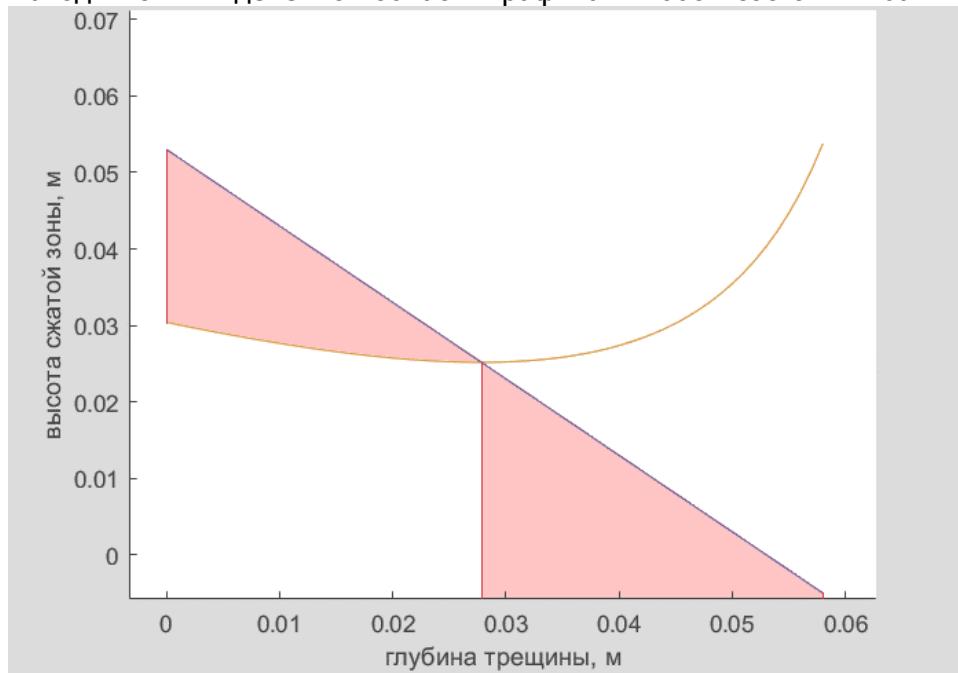


Рис 3. Область допустимых значений высоты сжатой зоны бетона

Назовем трещины, глубина которых попадает в 1 и 2 области трещинами первого и второго типа соответственно, и исследуем распределение напряжений в сечении и высоту сжатой зоны бетона. Для этого смоделируем в программном комплексе «ELCUT» данные случаи (Рис. 4–6), рассматривая железобетонную балку как упруго-деформируемую систему.

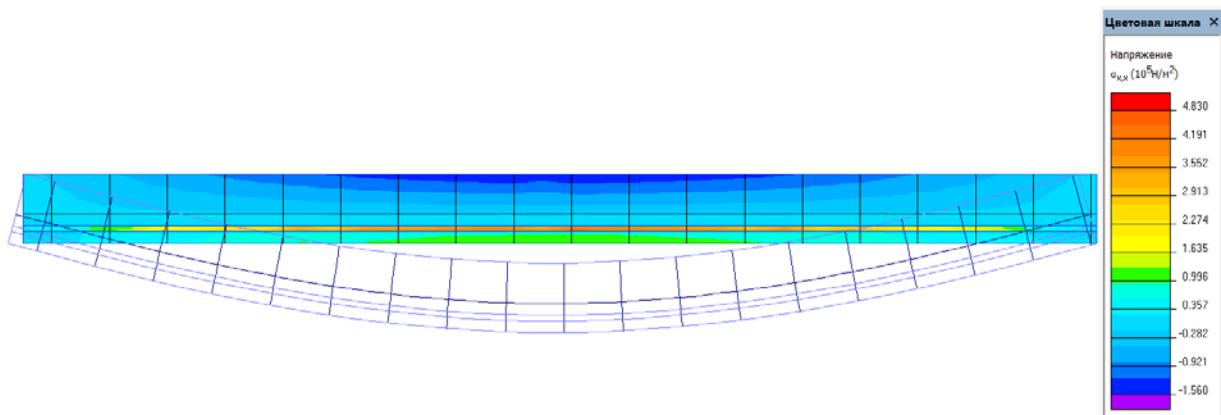


Рис. 4. Модель балки без трещин

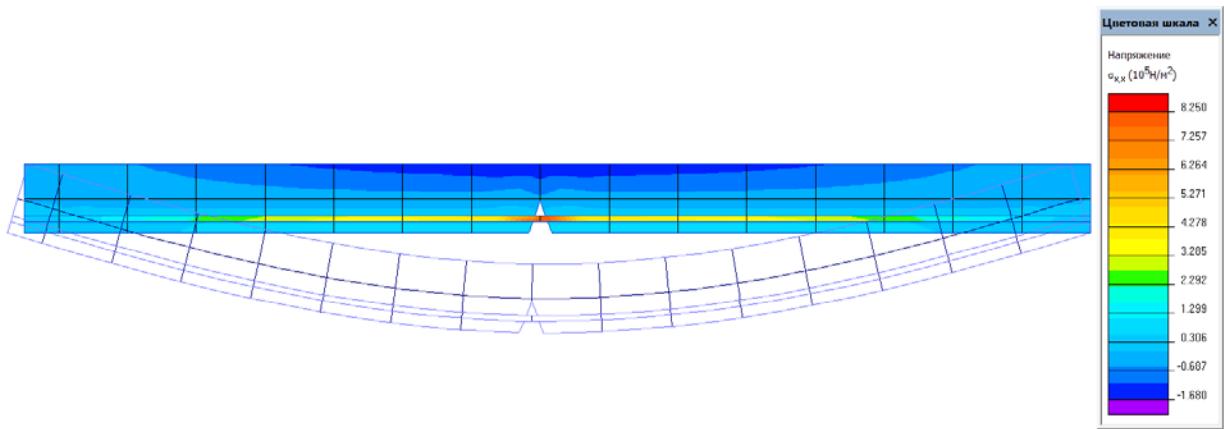


Рис. 5. Модель балки с трещиной первого типа

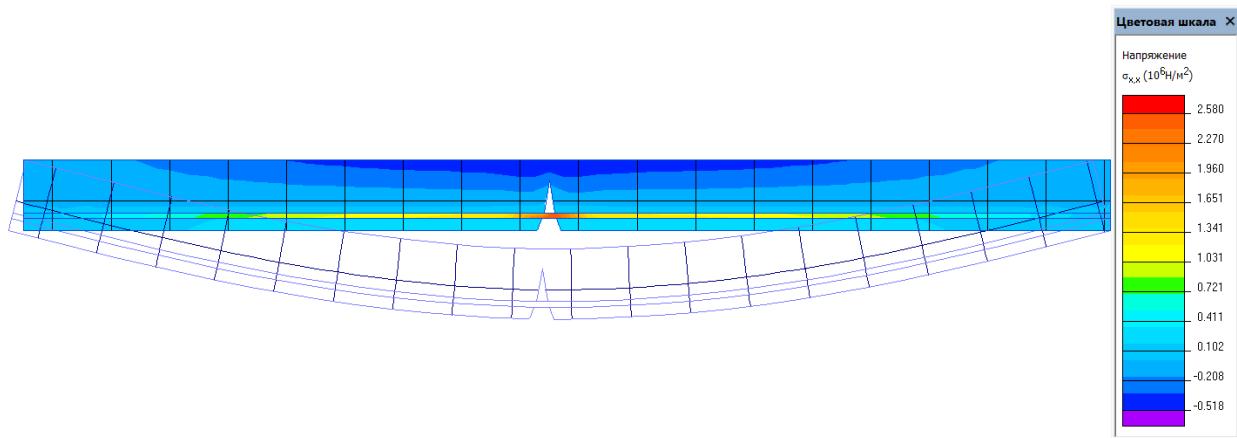


Рис. 6. Модель балки с трещиной второго типа

Полученные результаты представлены в Таблице 2.

Таблица 2
Результаты исследования

<i>Тип трещины</i>	<i>Результаты моделирования</i>			<i>Результаты теоретического расчета</i>	
	<i>Глубина трещины δ, мм</i>	<i>Остаточная высота сечения бетона, мм</i>	<i>Высота сжатой зоны X, мм</i>	<i>Максимальное значение высоты сжатой зоны X_{max}, мм</i>	<i>Минимальное значение высоты сжатой зоны X_{min}, мм</i>
Без трещины	-	60,00	29,65	53,00	30,00
Первый тип	23,00	37,00	27,33	35,00	27,00
Второй тип	43,00	17,00	15,31	17,00	0,00

Вывод: таким образом, с использованием математических зависимостей, были определены границы нахождения фактического значения высоты сжатой зоны бетона x , которые подтверждаются моделированием с использованием метода конечных элементов.

Полученные результаты позволяют приблизиться к решению задачи теоретического обоснования вибрационного метода обследования железобетонной конструкции, усовершенствования методов его проведения и повышения точности получаемых результатов.

Список литературы

1. Исхаков Ш.Ш., Ковалев Ф.Е., Мохнаткин А.П., Старчуков Д.С. Становление и развитие вибрационных систем мониторинга технического состояния несущих элементов стартовых сооружений. 2015. 110 с.
2. Исхаков Ш. Ш., Ковалёв Ф. Е., Зарин С. В. Об эффективности метода вибрационной диагностики элементов строительной части стартовых сооружений // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 10. С. 431–441.
3. Исхаков Ш. Ш., Ковалёв Ф. Е., Зарин С. В. Учет трещинообразований бетона в вибрационной диагностике пролетных железобетонных конструкций // Труды Военнокосмической академии имени А. Ф. Можайского. Вып. 2018. Вып. 663. С. 99–104.
4. Исхаков Ш. Ш., Ковалев Ф.Е., Косенков Р.Э., Мохнаткин А.П. Проблемы оценивания надежности и безопасности эксплуатируемых сооружений наземной космической инфраструктуры и идентификации их технических состояний // Известия ПГУПС. 2016. Т. 13, вып. 4(49). С. 592–599.
5. Ковалев Ф.Е., Мохнаткин А.П. Методика оценивания допредельных и предельных состояний пролетных железобетонных конструкций стартовых сооружений по параметру высоты сжатой зоны бетона. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2022. № 681. 170-175 с.

References

1. Iskhakov Sh.Sh., Kovalev F.E., Mokhnatkin A.P., Starchukov D.S. Formation and development of vibration monitoring systems for the technical condition of load-bearing elements of launch facilities. 2015. 110 p.
2. Iskhakov Sh. Sh., Kovalev F. E., Sarin S. V. On the effectiveness of the method of vibration diagnostics of elements of the construction part of launch facilities // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. 2018. I. 10. Pp. 431-441.
3. Iskhakov Sh. Sh., Kovalev F. E., Sarin S. V. Accounting for concrete cracking in vibration diagnostics of span reinforced concrete structures // Proceedings of the Military Space Academy named after A. F. Mozhaisky. 2018. I. 663. Pp. 99-104.
4. Iskhakov Sh. Sh., Kovalev F.E., Kosenkov R.E., Mokhnatkin A.P. Problems of assessing the reliability and safety of operated structures of ground-based space infrastructure and identification of their technical conditions // Izvestiya PGUPS. 2016. Vol. 13, I. 4(49). Pp. 592-599.
5. Kovalev F.E., Mokhnatkin A.P. Methodology for estimating the pre-limit and limit states of span reinforced concrete structures of launch facilities according to the height parameter of the compressed concrete zone. // Proceedings of the Military Space Academy named after A.F.Mozhaisky. 2022. No. 681. Pp. 170-175.