

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING AND CONSTRUCTION

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 5. С. 145–159.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (5): 145–159.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.012.042.8.001.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-145-159

EDN: PVGYZJ

УСЛОВНО УПРУГИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ БАЛКИ С РАСПОРОМ НА ПОДАТЛИВЫХ ОПОРАХ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Олег Григорьевич Кумпяк, Заур Рашидович Галяутдинов,
Дауд Рашидович Галяутдинов

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Конструирование и расчет железобетонных балочных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении требуют учета возникновения и развития реакции распора. Наличие распора может привести к значительному увеличению несущей способности и трещиностойкости балок в совокупности с применением податливых опор, которые позволяют снизить интенсивность динамического нагружения.

Цель работы представляет собой анализ положительной результативности установки податливых опор в распорных условно упругих изгибаемых конструкциях при интенсивном динамическом нагружении.

В работе представлен *метод* расчета железобетонных балочных конструкций в условно упругой стадии деформирования с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении, а также полученные на основании данного метода численные результаты и их анализ.

Выводы. Подтверждено, что прочность упругих железобетонных конструкций с распором непосредственно зависит от податливости в вертикальном направлении. Данные, полученные в работе, показывают результативность использования податливых опор в изгибаемых железобетонных конструкциях с распором при кратковременном динамическом нагружении.

Ключевые слова: коэффициент динамичности, динамика, распор, податливая опора, балка

Для цитирования: Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р., Галяутдинов Д.Р. Условно упругие железобетонные балки с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 145–159. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-145-159. EDN: PVGYZJ

ORIGINAL ARTICLE

CONDITIONALLY FLEXIBLE STEEL CONCRETE BEAMS WITH THRUST ON YIELDING SUPPORTS UNDER DYNAMIC LOAD

Oleg G. Kumpyak, Zaur R. Galyautdinov, Daud R. Galyautdinov
Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. Design and calculation of steel concrete beams on yielding supports under dynamic loading requires considering the development of the thrust reaction that can lead to a significant increase in the bearing capacity and crack resistance of beams with yielding supports, which reduce the intensity of dynamic loading.

Purpose: The aim of the work is to analyze the positive effectiveness of installing yielding supports in thrust conditionally flexible beams under intense dynamic loading.

Methodology: The strength analysis of steel concrete beams at conditionally elastic deformation with thrust on yielding supports under the dynamic load. Numerical results are based on this method.

Research findings: It is confirmed that the strength of flexible steel concrete beams with thrust directly depends on flexibility in the vertical direction.

Value: The effectiveness is shown for yielding supports in flexible steel concrete structures with thrust under short-term dynamic loading.

Keywords: dynamic load, thrust, yielding support, flexible steel concrete beam, dynamic coefficient

For citation: Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R. Conditionally Flexible Steel Concrete Beams with Thrust on Yielding Supports under Dynamic Load. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 145–159. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-145-159. EDN: PVGYZJ

Кратковременные динамические нагрузки возникают при взрывах газо-, паро-, пылевоздушных смесей, различного рода ударных воздействиях на конструкции, а также по причине прогрессирующего обрушения элементов зданий и сооружений. Вышеотмеченные нагрузки являются однократными и носят аварийный характер; приводят к значительным материальным затратам на частичное или полное восстановление зданий или сооружений [1].

Существует отдельный класс сооружений – убежища и укрытия гражданской обороны, для которых кратковременные динамические нагрузки учитываются при их проектировании и конструировании [2]. Конструкции данных сооружений должны полностью воспринимать действующую кратковременную динамическую нагрузку. В связи с этим возрастает актуальность развития и применения активных способов защиты как отдельных конструкций, так

и зданий и сооружений в целом, позволяющих снизить интенсивность динамического воздействия и, следовательно, уменьшить финансовые затраты на строительство зданий и сооружений.

К активному способу защиты зданий и сооружений можно отнести податливые опоры [2–19]. Экспериментально-теоретические исследования железобетонных балок и опертых по контуру плит на податливых опорах [4, 13–19] свидетельствуют о высокой эффективности их применения. В этом случае степень снижения динамической реакции определяется упругопластическими свойствами податливой опоры и соотношением жесткостей опоры и конструкции [4, 13, 14, 15, 21, 24, 25].

Вышеотмеченные сооружения гражданской обороны возводятся в монолитном и сборно-монолитном исполнении с жестким сопряжением конструктивных элементов и представляют собой многократно статические неопределимые системы. При динамическом деформировании, вследствие ограничения горизонтального смещения конструкций в уровне перекрытий, возникает распор, который приводит к значительному увеличению несущей способности изгибаемых элементов [20–26].

Влияние распора и вертикальной податливости опор на прочность и деформативность железобетонных балок при динамическом нагружении достаточно изучено по отдельности. Однако вопрос совместного применения податливых опор и учет распора в сооружениях гражданской обороны представляет научный и практический интерес и является актуальной проблемой.

Цель исследования заключается в оценке одновременного влияния вертикальной и горизонтальной податливости конструкций на опорах для условно упругих железобетонных балок с распором.

В исследовании изучены железобетонные балки при упругом деформировании с учетом вертикальной и горизонтальной податливости при динамическом нагружении. Развитие во времени на шаге расчета (s) воспроизводится зависимостью

$$p(t) = p_1 - \frac{(p_1 - p_2)}{(t_2 - t_1)}(t - t_1) = p_1 - \Delta p(t - t_1), \quad (1)$$

где t – текущая координата времени; p_1 , p_2 – значение нагрузки на рассматриваемом участке в начале и конце соответственно для расчетного шага (s); t_1 , t_2 – значение времени на рассматриваемом участке в начале и конце соответственно.

Формула (1) дает возможность представить развитие нагрузки во времени как на нисходящем, так и на восходящем участках диаграммы, что позволяет ввести в расчет произвольную нагрузку, разбитую множеством линейных участков. Так как реакция распора изменяется в процессе деформирования, то применение шагового расчета необходимо.

В настоящей работе использован приближенный метод, который заключается в задании формы прогибов. При условно упругом деформировании балки для получения уравнения движения в условно упругой стадии применен принцип возможных перемещений (рис. 1) [21, 22, 27].

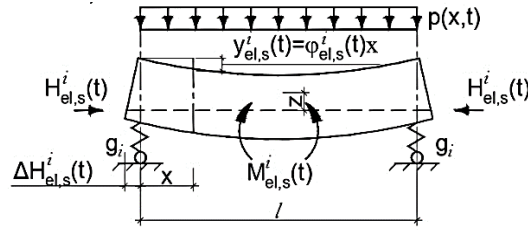


Рис. 1. Схема, заложенная в расчет для условно упругой балки с вертикальной и горизонтальной податливостью

Fig. 1. The scheme included in the strength analysis of conditionally flexible beam with vertical and horizontal compliance

$$\ddot{T}_{el,s}^i(t) + \omega_{H,el}^2 T_{el,s}^i(t) = \omega_1^2 p(t), \quad (2)$$

где $\omega_{H,el} = \sqrt{\omega_1^2 + k / \left(1 + \frac{\pi^4}{2W_i}\right)}$ – частота колебаний балки с ограничением горизонтального смещения; $k = \frac{4\pi^2 z^2}{cm l^3}$ – коэффициент, учитывающий влияние рас-

пора, а именно податливость в горизонтальном направлении; $\omega_1 = \omega / \sqrt{1 + \frac{\pi^4}{2W_i}}$ –

частота колебания изгибаемой конструкции на сминаемых вставках; $\omega = \frac{\pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{B}{m}}$ – частота колебания изгибаемой конструкции на жестких опорах; B – жесткость балочной конструкции с учетом трещин в бетоне; m – погонная масса конструкции; $p(t)$ – закон изменения нагрузки во времени; $W_i = \frac{g_i l^3}{B}$ – параметр, характеризующий соотношение жесткостей балки и податливых опор; g_i – жесткость сминаемых вставок в i -й стадии деформирования.

При заданном законе развития нагрузки (1) во времени решение уравнения движения (2) будет иметь следующий вид:

$$T_{el,s}^i(t) = \sin(\omega_{H,el} t) A_{el,s}^i - \cos(\omega_{H,el} t) B_{el,s}^i - \frac{\omega_1 (\Delta p(t - t_1) - p_1)}{\omega_{H,el}^2}. \quad (3)$$

Неизвестные константы в выражении (3) находятся на основании начальных условий, а именно при равенстве первой производной функции динамичности и функции динамичности значениям на предшествующем шаге расчета: $T_{el,s}^i(t) = T_{el,s-1}^i(t)$, $\dot{T}_{el,s}^i(t) = \dot{T}_{el,s-1}^i(t)$ [21, 27].

Максимум функции динамичности достигается в момент времени, который определяется зависимостью $\dot{T}_{el,s}^i(t_{\max}) = 0$ [21, 27].

Величина коэффициента динамичности в условно упругой стадии определяется выражением $k_{d,HSY} = T_{el,s}^i(t_{\max})$ [21, 27].

Перемещения податливых опор в зависимости от стадии их деформирования для балок в условно упругой стадии определяются выражениями:

– упругая:

$$u_{el,s}^{el}(t) = \frac{pl}{2g_{el}} T_{el,s}^{el}(t);$$

– упругопластическая:

$$u_{el,s}^{pl}(t) = \frac{pl}{2g_{pl}} T_{el,s}^{pl}(t) + \left(1 - \frac{g_{el}}{g_{pl}}\right) u_{el}^{pl}(t_{SY,el});$$

– упругопластическая с отвердением:

$$u_{el,s}^h(t) = \frac{pl}{2g_h} T_{el,s}^h(t) + \left(1 - \frac{g_{pl} - g_{el}}{g_h}\right) u_{el}^{el}(t_{SY,el}) + \left(1 - \frac{g_{pl}}{g_h}\right) u_{el}^{pl}(t_{SY,pl}).$$

Методика расчета заключается в циклическом расчете на каждом этапе условно упругих железобетонных балок с горизонтальной и вертикальной податливостью при интенсивном динамическом воздействии. На каждом шаге расчета определяется функция динамичности железобетонной балки на податливых опорах, при этом учитывается фактическая величина реакции распора в зависимости от угла поворота балки [21, 27].

Оценка распора выполнялась по величине c_1 , характеризующей соотношение продольной жесткости балки к жесткости конструкции, препятствующей горизонтальному смещению, и определяется зависимостью $c_1 = cE_b b h_0 / l$.

Для железобетонных балок на податливых опорах под действием мгновенно нарастающей динамической нагрузки установлено уменьшение коэффициента динамичности, которое связано со снижением временно частотной характеристики $(\omega\theta)$ (рис. 2, а). Стоит отметить, что при минимизации соотношения жесткостей сминаемой вставки и балочной конструкции наблюдается снижение перемещений и усилий по сравнению с балками на жестких опорах [Там же]. Влияние степени податливости конструкции в горизонтальном направлении при отсутствии возможности ее вертикального смещения на опорах представлено на рис. 2, б, при этом снижение коэффициента динамичности условно упругих балок с распором происходит с увеличением $\omega\theta$ и составляет до 40 %. Вышеизложенное дает возможность сделать следующий вывод: сочетание горизонтальной податливости (c_1) и вертикальной податливости опор W_{el} (рис. 3) снижает коэффициент динамичности вне зависимости от параметра $\omega\theta$ для изгибаемых конструкций, которые работают в условно упругой стадии, по сравнению как с балками с распором, так и с балками на податливых опорах [Там же].

При действии постепенно нарастающей динамической нагрузки при $\theta_2 / \theta_1 = 1$ наблюдается снижение коэффициента динамичности до 48 % для условно упругих конструкций с распором со снижением параметра c_1 относительно балок как на жестких опорах (рис. 4, б), так и на податливых опорах (рис. 5). Необходимо отметить, что снижение жесткости податливых опор (рис. 4, а) не приводит к уменьшению коэффициента динамичности во всем

диапазоне $\omega\theta_1$, при этом увеличение составляет до 50 % относительно балок на жестких опорах.

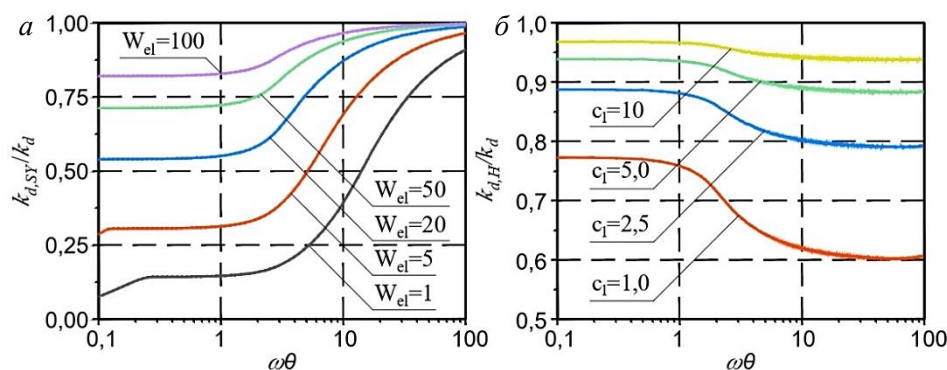


Рис. 2. Влияние на коэффициент динамичности условно упругих конструкций при действии мгновенно нарастающей нагрузки в зависимости от $\omega\theta$:

a – упругих податливых опор; b – распора

Fig. 2. Dependences of yielding supports (a) and thrust (b) on the dynamic coefficient of conditionally flexible beams under instantly increasing load, depending on $\omega\theta$

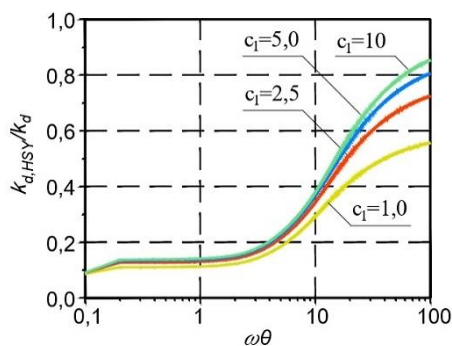


Рис. 3. Влияние распора для условно упругих балок на упругих податливых опорах $W_{el}=1$ при действии мгновенно нарастающей нагрузки

Fig. 3. Thrust for conditionally flexible beams on elastic yielding supports $W_{el}=1$ under instantly increasing load

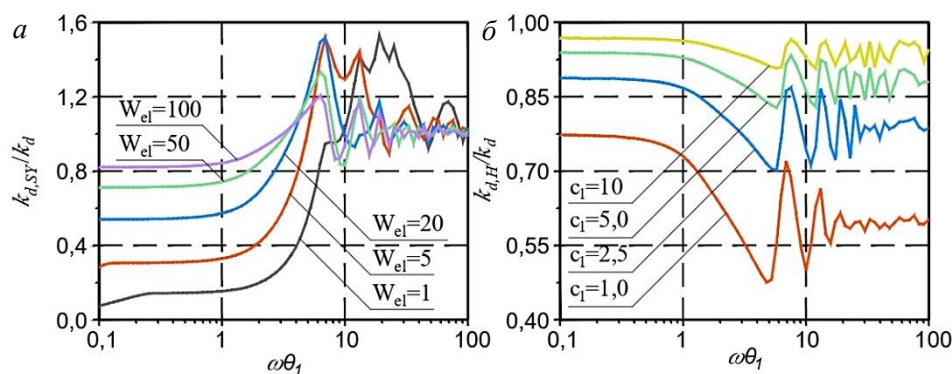


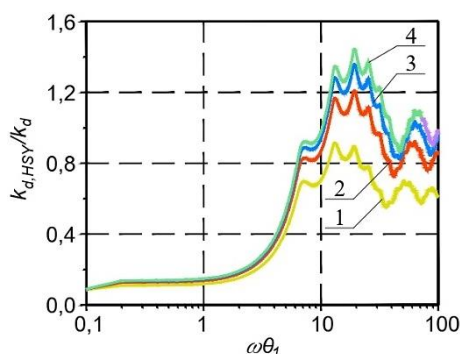
Рис. 4. Влияние на коэффициент динамичности конструкций при действии постепенно нарастающей нагрузки ($\theta_2/\theta_1=1$) в зависимости от $\omega\theta_1$:

a – упругих податливых опор; b – распора

Fig. 4. Elastic yielding supports (a) and thrust (b) affecting the dynamic coefficient under increasing load ($\theta_2/\theta_1=1$), depending on $\omega\theta_1$

Рис. 5. Действие горизонтальной податливости на изгибаемые конструкции на податливых опорах, деформируемых в упругой области (при $W_{el} = 1$) при нагрузке, изменяющейся по постепенно нарастающему закону при $\theta_2 / \theta_1 = 1$ в зависимости от $\omega\theta_1$: 1 – $c_1 = 1$; 2 – $c_1 = 2,5$; 3 – $c_1 = 5$; 4 – $c_1 = 10$

Fig. 5. Horizontal compliance affecting flexible beams on yielding supports deformed in the elastic region (at $W_{el} = 1$) under gradually increasing load at $\theta_2 / \theta_1 = 1$, depending on $\omega\theta_1$: 1 – $c_1 = 1$; 2 – $c_1 = 2,5$; 3 – $c_1 = 5$; 4 – $c_1 = 10$



Эффективность применения податливых опор в безраспорных условно упругих конструкциях при действии постепенно нарастающей нагрузки, в зависимости от соотношения θ_2 / θ_1 (рис. 6, а), проявляется в достаточно узком диапазоне параметра $\omega\theta_1$, который уменьшается с увеличением жесткости опор.

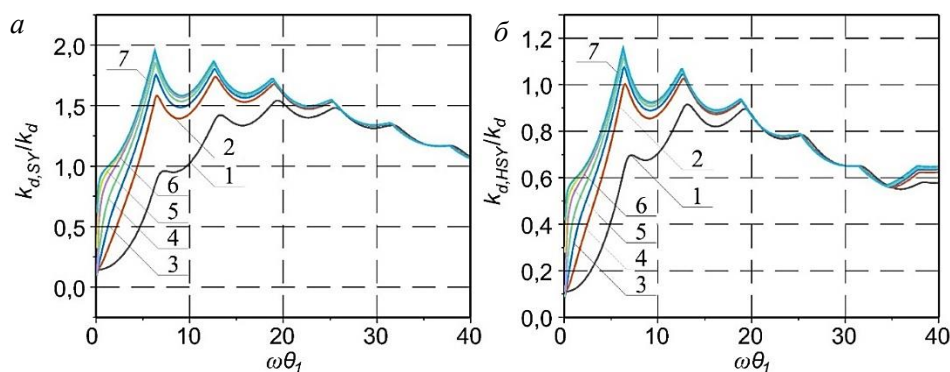


Рис. 6. Отношение коэффициентов динамичности к конструкциям на жестких опорах без распора от временно частотной характеристики $\omega\theta_1$ при динамическом воздействии с постепенным нарастанием:

а – на податливых опорах; б – с распором на податливых опорах: 1 – $\theta_2 / \theta_1 = 1$; 2 – $\theta_2 / \theta_1 = 5$; 3 – $\theta_2 / \theta_1 = 10$; 4 – $\theta_2 / \theta_1 = 20$; 5 – $\theta_2 / \theta_1 = 50$; 6 – $\theta_2 / \theta_1 = 100$; 7 – $\theta_2 / \theta_1 = 200$

Fig. 6. Dynamic coefficients of yielding supports (a) and thrust on yielding supports (b) for beams on rigid supports without thrust from the time-frequency characteristic $\omega\theta_1$ under gradually increasing dynamic load:

1 – $\theta_2 / \theta_1 = 1$; 2 – $\theta_2 / \theta_1 = 5$; 3 – $\theta_2 / \theta_1 = 10$; 4 – $\theta_2 / \theta_1 = 20$; 5 – $\theta_2 / \theta_1 = 50$; 6 – $\theta_2 / \theta_1 = 100$; 7 – $\theta_2 / \theta_1 = 200$

В полученных диаграммах область положительной эффективности вертикальной податливости для балок с реакцией распора и без нее соответствует значениям ординаты меньше 1, т. е. $k_{d,sy}(k_{d,HSY})/k_d \leq 1$. Наличие горизонтальной податливости (c_1) в балках с вертикальной податливостью дает воз-

возможность увеличить область положительного влияния (рис. 6, б) в сравнении с балками без учета распора (рис. 6, а). При этом степень расширения области положительного влияния распора и вертикальной податливости опор зависит от горизонтальной податливости c_1 и соотношения жесткостей податливой опоры и железобетонной балки W_{el} .

Для оценки перехода податливой опоры в пластическую стадию, помимо величин, учитываемых при анализе влияния упругих податливых опор на усилия и перемещения балок (c_1 , W_{el}), также рассмотрено влияние времени перехода сминаемых вставок из упругой в пластическую стадию $t_{SY,el} = (0,01...0,99)t_{max}$ (t_{max} – время достижения максимума функцией динамичности при упругом деформировании податливых опор) при действии мгновенно (рис. 7) и постепенно нарастающей кратковременной динамической нагрузки (рис. 8) для частотно-временной характеристики $\omega\theta(\omega\theta_1) = 1...20$.

При мгновенно нарастающей нагрузке область положительных значений $k_{d,SY}(k_{d,HSY})/k_d < 1$ наблюдается во всем спектре $t_{SY,el}$ (рис. 7).

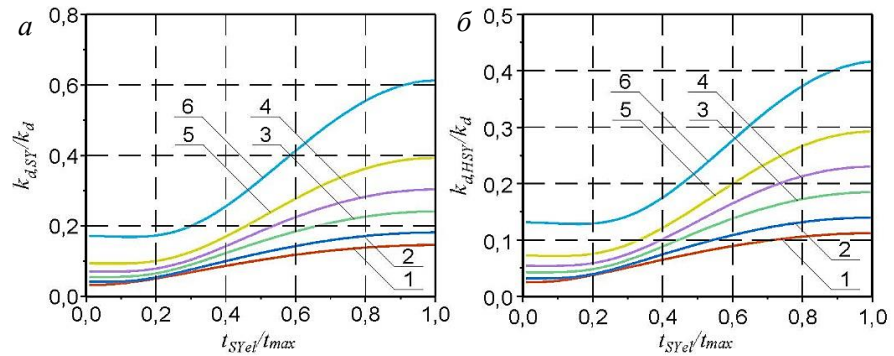


Рис. 7. Отношение коэффициентов динамичности к конструкциям на жестких опорах без распора в зависимости от соотношения времени перехода податливой опоры из упругой области в пластическую ($t_{SY,el}$) к времени достижения максимума функцией динамичности (t_{max}) для условно упругих железобетонных балок на податливых опорах ($W_{el} = 1$) при действии мгновенно нарастающей нагрузки:

а – на податливых опорах; б – с распором на податливых опорах: 1 – $\omega\theta = 1$; 2 – $\omega\theta = 3$; 3 – $\omega\theta = 5$; 4 – $\omega\theta = 7$; 5 – $\omega\theta = 10$; 6 – $\omega\theta = 20$

Fig. 7. Dynamic coefficients of yielding supports (a) and thrust on yielding supports (b) for beams on rigid supports without thrust depending on elastic-to-plastic transition time ($t_{SY,el}$) and time of reaching the maximum by the dynamic function (t_{max}) for conditionally flexible steel concrete beams on yielding supports ($W_{el} = 1$) under instantly increasing load:

1 – $\omega\theta = 1$; 2 – $\omega\theta = 3$; 3 – $\omega\theta = 5$; 4 – $\omega\theta = 7$; 5 – $\omega\theta = 10$; 6 – $\omega\theta = 20$

Установлено уменьшение величины коэффициента динамичности $k_{d,HSY}$ для распорных конструкций в зависимости от снижения величины c_1 . По полученной

диаграмме можно установить время оптимального перехода опоры из упругой в пластическую стадию, которое определено границами $t_{SY,el}^{opt} = (0,1 \dots 0,25)t_{max}$ в зависимости от параметра $\omega\theta_1$. Наличие ограничения в горизонтальном направлении, т. е. при $c_1 = 1$, дает возможность уменьшить $k_{d,SY}(k_{d,HSY})/k_d$ до 25 %.

При действии на балки постепенно нарастающей нагрузки влияние податливых опор на коэффициент динамичности в условно упругой конструкции носит неоднозначный характер (рис. 8). Положительный эффект ($k_{d,SY}(k_{d,HSY})/k_d < 1$) прослеживается уже не при всех значениях $\omega\theta_1$. Однако в изученных в работе областях $\omega\theta_1$ имеет место быть оптимальное значение времени перехода опоры в пластическую стадию $t_{SY,el}^{opt}$, при которой коэффициент динамичности балок на податливых опорах без распора $k_{d,SY}$ меньше по сравнению с балками на несмещаемых опорах. Это значит, что применение податливых опор, деформирующихся в упругой и пластической стадиях, позволяет снизить усилия и перемещения конструкции во всем диапазоне изменения параметра $\omega\theta_1 = 1 \dots 20$.

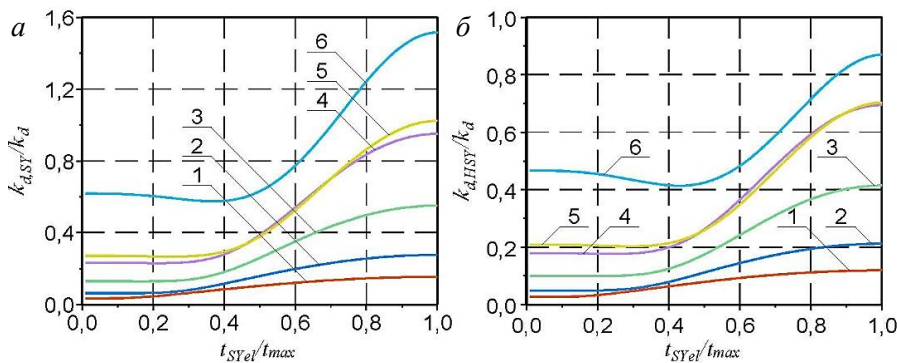


Рис. 8. Отношение коэффициентов динамичности к конструкциям на жестких опорах без распора в зависимости от соотношения времени перехода податливой опоры из упругой области в пластическую ($t_{SY,el}$) к времени достижения максимума функцией динамичности (t_{max}) для условно упругих железобетонных балок на податливых опорах ($W_{el} = 1$) при действии постепенно нарастающей нагрузки:

a – на податливых опорах; b – с распором на податливых опорах: 1 – $\omega\theta_1 = 1$; 2 – $\omega\theta_1 = 3$; 3 – $\omega\theta_1 = 5$; 4 – $\omega\theta_1 = 7$; 5 – $\omega\theta_1 = 10$; 6 – $\omega\theta_1 = 20$

Fig. 8. Dynamic coefficients of yielding supports (a) and thrust on yielding supports (b) for beams on rigid supports without thrust depending on elastic-to-plastic transition time ($t_{SY,el}$) and time of reaching the maximum by the dynamic function (t_{max}) for conditionally flexible steel concrete beams on yielding supports ($W_{el} = 1$) under instantly increasing load:

1 – $\omega\theta_1 = 1$; 2 – $\omega\theta_1 = 3$; 3 – $\omega\theta_1 = 5$; 4 – $\omega\theta_1 = 7$; 5 – $\omega\theta_1 = 10$; 6 – $\omega\theta_1 = 20$

Рассмотрим деформирование податливых опор в упругопластической стадии с последующим переходом в отверждение ($i = h$). Для рассмотрения по-

датливых опор в стадии отвердения принято оптимальное время перехода в пластическую стадию ($t_{SY,el}^{opt}$) для того, чтобы получить значения коэффициентов динамичности ($k_{d,HSY}$), соответствующие максимальному снижению. Анализ выполнен по времени перехода сминаемых вставок из пластической в стадию отвердения при $t_{SY,pl} = (0,01...0,99)t_{max}$ (t_{max} – время достижения максимума функцией динамичности при упругопластическом деформировании податливых опор) (рис. 9, 10).

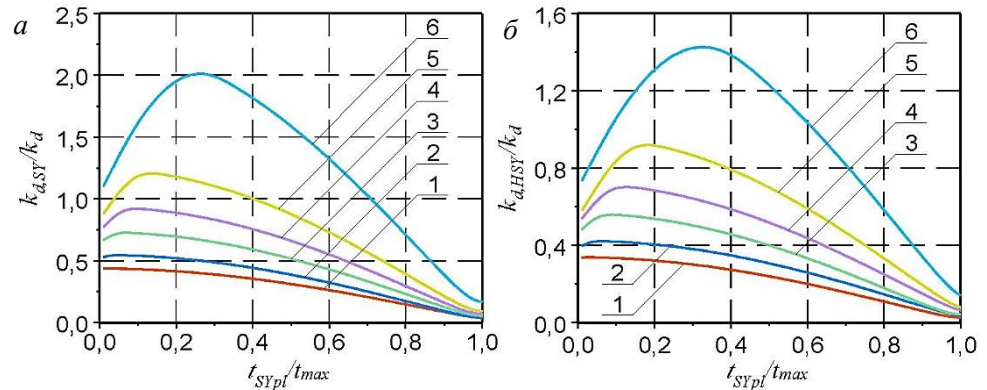


Рис. 9. Отношение коэффициентов динамичности к конструкциям на жестких опорах без распора в зависимости от соотношения времени перехода податливой опоры из пластической области в отвердение ($t_{SY,pl}$) к времени достижения максимума функцией динамичности (t_{max}) при действии мгновенно нарастающей нагрузки:

a – на податливых опорах; b – с распором на податливых опорах: 1 – $\omega\theta=1$; 2 – $\omega\theta=3$; 3 – $\omega\theta=5$; 4 – $\omega\theta=7$; 5 – $\omega\theta=10$; 6 – $\omega\theta=20$

Fig. 9. Dynamic coefficients of yielding supports (a) and thrust on yielding supports (b) for beams on rigid supports without thrust depending on plastic-to-solid transition time ($t_{SY,pl}$) and time of reaching the maximum by the dynamic function (t_{max}) under instantly increasing load:

1 – $\omega\theta=1$; 2 – $\omega\theta=3$; 3 – $\omega\theta=5$; 4 – $\omega\theta=7$; 5 – $\omega\theta=10$; 6 – $\omega\theta=20$

Переход податливых опор из пластической стадии в отвердение сопровождается резким ростом коэффициента динамичности.

Данный фактор связан с тем, что в момент перехода в стадию отвердения наблюдается уменьшение скорости балки, что приводит к повышению нагрузки на величину инерционного воздействия. При пластическом же деформировании сминаемых вставок конструкция получает дополнительное ускорение. Таким образом, на коэффициент динамичности влияют скорость балки и время перехода опоры в стадию отвердения ($t_{SY,pl}$).

В конструкциях на сминаемых вставках при мгновенно нарастающей нагрузке зона выгодных значений ($k_{d,SY} / k_d < 1$) установлена для всех значений $t_{SY,pl}$ при $\omega\theta \leq 7$. При временно частотной характеристике более 7 ($\omega\theta > 7$) раз-

вивается область отрицательного влияния распора и податливости опор на величину $k_{d,HSY}$ (рис. 9, а). Для конструкций на податливых опорах с распором со снижением величины c_1 происходит снижение коэффициента динамичности и расширение области положительного влияния для диапазона $\omega\theta \leq 10$ (рис. 9, б).

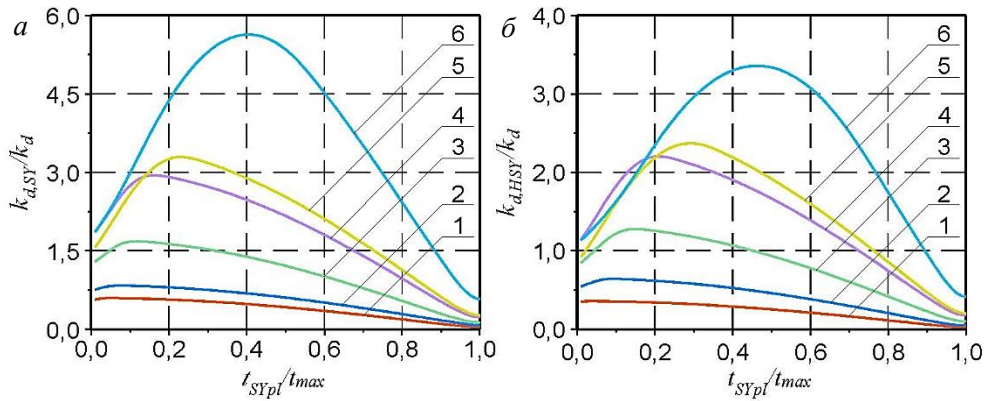


Рис. 10. Отношение коэффициентов динамичности к конструкциям на жестких опорах без распора в зависимости от соотношения времени перехода податливой опоры из пластической области в отверждение ($t_{SY,pl}$) к времени достижения максимума функций динамичности (t_{max}) при действии постепенно нарастающей нагрузки:

а – на податливых опорах; б – с распором на податливых опорах: 1 – $\omega\theta_1 = 1$; 2 – $\omega\theta_1 = 3$; 3 – $\omega\theta_1 = 5$; 4 – $\omega\theta_1 = 7$; 5 – $\omega\theta_1 = 10$; 6 – $\omega\theta_1 = 20$

Fig. 10. Dynamic coefficients of yielding supports (a) and thrust on yielding supports (b) for beams on rigid supports without thrust depending on plastic-to-solid transition time ($t_{SY,pl}$) and time of reaching the maximum by the dynamic function (t_{max}) under instantly increasing load:

1 – $\omega\theta_1 = 1$; 2 – $\omega\theta_1 = 3$; 3 – $\omega\theta_1 = 5$; 4 – $\omega\theta_1 = 7$; 5 – $\omega\theta_1 = 10$; 6 – $\omega\theta_1 = 20$

В целом характер изменения коэффициента динамичности при постепенно нарастающей нагрузке ($\theta_2/\theta_1 = 1$) (рис. 10) аналогичен мгновенно нарастающей нагрузке как для балок с распором, так и без него. В конструкциях на сминаемых вставках при постепенно нарастающей нагрузке зона выгодных значений ($k_{d,SY}/k_d < 1$) установлена для всех значений $t_{SY,pl}$ при $\omega\theta \leq 3$. Учет ограничения горизонтального смещения позволяет добиться уменьшения коэффициента динамичности на всем рассматриваемом интервале $t_{SY,pl}$ и $\omega\theta_1$ по сравнению с балками на податливых опорах без распора.

Выводы

Ограничение горизонтального смещения для условно упругих балочных конструкций на сминаемых вставках при кратковременном динамическом воздействии при рассмотренных значениях $\omega\theta$ ($\omega\theta_1$) дает возможность повысить зону эффективности применения сминаемых вставок ($k_{d,SY}/k_d < 1$) вне зависи-

мости от стадии ее работы. Выявлено, что с увеличением временно частотной характеристики $\omega\theta(\omega\theta_1)$ эффективность от ограничения горизонтального смещения растет, а от сминаемых вставок снижается. На основании выполненной работы можно заключить, что учет реакции распора в изгибаемых конструкциях при вертикальной податливости приводит к снижению коэффициента динамичности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бирбраер А.Н., Роleder А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического университета, 2009. 594 с.
2. СП 88.13330.2014. Защитные сооружения гражданской обороны. Актуализированная редакция СНиП II-11-77*. Москва : Минстрой России, ФАУ «ФЦС», 2014. 152 с.
3. Галяутдинов З.Р., Галяутдинов Д.Р., Гандзий М.В. Численно-экспериментальные исследования податливых опор при кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 4. С. 103–110. DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-4-103-110
4. Галяутдинов З.Р. Прочность и деформативность железобетонных балочных и плитных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Галяутдинов Заур Рашидович. Томск, 2021. 48 с.
5. Elfetori F.A. Experimental Testing of Composite Tubes with Different Corrugation Profile Subjected to Lateral Compression Load World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical // Industrial Science and Engineering. 2013. V. 7. № 2. P. 183–186.
6. Chiaia B., Kumpyak O., Placidi L., Maksimov V. Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading // Engineering Structures. 2015. № 96. P. 88–99.
7. Fan Z., Shen J., Lu G. Investigation of Lateral Crushing of Sandwich Tubes. The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction // Procedia Engineering. 2011. № 14. P. 442–449.
8. Kellas S. Design, Fabrication and Testing of a Crushable Energy Absorber for a Passive Earth Entry Vehicle // NASA/CR-2002-211425. 2002. 49 p.
9. Lion K.H., Amir R.A.G., Prasetyo E., Khairi Y. Impact Energy Absorption of Concentric Circular Tubes // Wseas transactions on applied and theoretical mechanics. 2009. V. 4. № 3. P. 95–104.
10. Lipa S., Kotelko M. Lateral impact of tubular structure – theoretical and experimental analysis. Part 1 – Investigation of single tube // Journal of theoretical and applied mechanics. 2013. V. 51. № 4. P. 873–882.
11. Somya P., Chawalit T., Umphisak T. An Analysis of Collapse Mechanism of Thin-Walled Circular Tubes. Subjected to Bending World Academy of Science // Engineering and Technology. 2007. V. 36. P. 329–334.
12. Younes M.M. Finite Element Modeling of Crushing Behaviour of Thin Tubes with Various Cross-Sections // 13th International Conference on Aerospace Science, Aviation Technology, ASAT – 13. 2009. URL: https://www.researchgate.net/publication/267254384_Finite_Element_Modeling_of_Crushing_Behaviour_of_Thin_Tubes_with_Various_Cross-Sections?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InByb2ZpbGUifX0 (дата обращения: 20.01.2025).
13. Галяутдинов З.Р., Кумпяк О.Г. Расчет железобетонных балок на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // Строительная механика и расчет сооружений. 2022. № 5. С. 33–41.
14. Галяутдинов З.Р., Кумпяк О.Г., Галяутдинов Д.Р., Шипилова Е.В. Динамический расчет железобетонных балок на податливых опорах за пределами упругости // Строительная механика и расчет сооружений. 2019. № 4. С. 63–70.

15. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р., Кокорин Д.Н. Прочность и деформативность железобетонных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2016. 270 с.
16. Одокопылов Г.И., Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р., Галяутдинов Д.Р. Определение параметров живучести защищенных ответственных строительных конструкций при ударно-волновом нагружении // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 4. С. 110–125. DOI: 10.18799/24131830/2019/4/231
17. Расторгуев Б.С. Обеспечение живучести зданий при особых динамических воздействиях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2003. № 4. С. 45–48.
18. Расторгуев Б.С. Прочность железобетонных конструкций зданий взрывоопасных производств и специальных сооружений, подверженных кратковременным динамическим воздействиям : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Расторгуев Борис Сергеевич. Москва, 1987. 37 с.
19. Саид А.-Р.А. Повышение несущей способности железобетонных конструкций при взрывных воздействиях : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Абдулль Рахман Абдуллах Саид. Москва, 1995. 207 с.
20. Виноградова Т.Н. Влияние распора на работу железобетонных балочных конструкций при кратковременных динамических воздействиях : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Виноградова Тамара Николаевна. Москва, 1977. 155 с.
21. Галяутдинов Д.Р. Прочность и деформативность железобетонных балок с распором при кратковременном динамическом нагружении на податливых опорах : специальность 2.1.1. «Строительные конструкции, здания и сооружения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Галяутдинов Дауд Рашидович. Томск, 2023. 24 с.
22. Галяутдинов Д.Р. Прочность и деформативность железобетонных балок с распором при кратковременном динамическом нагружении на податливых опорах : специальность 2.1.1. «Строительные конструкции, здания и сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Галяутдинов Дауд Рашидович. Томск, 2023. 221 с.
23. Гвоздев А.А., Дмитриев С.А., Крылов С.М. Новое о прочности железобетона. Москва : Стройиздат, 1976. 272 с.
24. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р., Галяутдинов Д.Р. Влияние распора на прочность железобетонных балок на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // Известия вузов. Строительство. 2023. № 1. С. 5–16. EDN: JCUIVA
25. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р. Экспериментальные исследования опертых по контуру железобетонных плит с распором // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 3. С. 113–120.
26. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Расчет железобетонных конструкций на действие кратковременных динамических нагрузок. Москва : Стройиздат, 1964. 151 с.
27. Кумпяк О.Г., Галяутдинов Д.Р. Метод расчета железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. № 5. С. 81–97. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-81-97

REFERENCES

1. Birbrayer A.N., Roleder A.Yu. Extreme Impacts on Structures. Saint-Petersburg, 2009. 594 p. (In Russian).
2. SP 88.13330.2014. The protective shelters of civil defense. Updated edition of SNiP II-11-77*. Moscow, 2014. 152 p. (In Russian)
3. Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R., Gandziy M.V. Numerical and Experimental Research of Yielding Supports in Dynamic Loading. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2018; 20 (4): 103–110. DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-4-103-110 (In Russian)

4. Galyautdinov Z.R. "Strength and deformability of reinforced concrete beam and slab structures on yielding supports under dynamic loading". DSc Abstract. Tomsk, 2021. 48 p. (In Russian)
5. Elfetori F.A. Experimental Testing of Composite Tubes with Different Corrugation Profile Subjected to Lateral Compression Load. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*. 2013; 7 (2): 183–186.
6. Chiaia B., Kumpyak O., Placidi L., Maksimov V. Experimental Analysis and Modeling of Two-Way Reinforced Concrete Slabs over Different Kinds of Yielding Supports under Short-Term Dynamic Loading. *Engineering Structures*. 2015; (96): 88–99.
7. Fan Z., Shen J., Lu G. Investigation of Lateral Crushing of Sandwich Tubes. In: *Proc. 12th East Asia-Pacific Conf. on Structural Engineering and Construction. Procedia Engineering*. 2011; (14): 442–449.
8. Kellas S., Corliss J. Design, Fabrication and Testing of a Crushable Energy Absorber for a Passive Earth Entry Vehicle. *Engineering, Environmental Science*, 2002.
9. Lion K.H., Amir R.A.G., Prasetyo E., Khairi Y. Impact Energy Absorption of Concentric Circular Tubes. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. 2009; 4 (3): 95–104.
10. Lipa S., Kotelko M. Lateral Impact of Tubular Structure – Theoretical and Experimental Analysis. Part 1 – Investigation of Single Tube. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2013; 51 (4): 873–882.
11. Somya P., Chawalit T., and Umphisak T. An Analysis of Collapse Mechanism of Thin-Walled Circular Tubes. Subjected to Bending World Academy of Science. *Engineering and Technology*. 2007; 36: 329–334.
12. Younes M.M. Finite Element Modeling of Crushing Behaviour of Thin Tubes with Various Cross-Sections. In: *Proc. 13th Int. Conf. 'Aerospace Science, Aviation Technology'*, May 26–28. 2009.
13. Galyautdinov Z.R., Kumpyak O.G. Strength Analysis of Reinforced Concrete Beams on Yielding Supports under Dynamic Loading. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2022; (5): 33–41. (In Russian).
14. Galyautdinov Z.R., Kumpyak O.G., Galyautdinov D.R., Shipilova E.V. Dynamic Calculation of Reinforced Concrete Beams on Yielding Supports beyond Limits of Elasticity. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2019; (4): 63–70. (In Russian)
15. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Strength and Deformability of Reinforced Concrete Structures on Yielding Supports under Dynamic Loading. Tomsk: TSUAB, 2016. 270 p. (In Russian)
16. Odnokopylov G.I., Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov Z.R. Determination of Survivability Parameters of Protected Critical Building Structures under Shock-Wave Loading. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2019; 330 (4): 110–125. (In Russian)
17. Rastorguev B.S. Ensuring Survivability of Buildings under Special Dynamic Effects. *Bezopasnost' sooruzhenii*. 2003; (4): 45–48. (In Russian)
18. Rastorguev B.S. "Strength of reinforced concrete building structures in explosive industries and special structures subject to dynamic load". DSc Abstract. 1987. 37 p. (In Russian)
19. Said A.-R.A. "Increasing the bearing capacity of reinforced concrete structures under explosive effects". DSc Thesis. 1995. 207 p. (In Russian)
20. Vinogradova T.N. "Thrust effect on reinforced concrete beam under dynamic load". PhD Thesis, 1977. 155 p. (In Russian)
21. Galyautdinov D.R. "Strength and deformability of reinforced concrete beam with thrust on yielding supports under dynamic loading". PhD Abstract 2023. 24 p. (In Russian)
22. Galyautdinov D.R. "Strength and deformability of reinforced concrete beam with thrust on yielding supports under dynamic loading". PhD Abstract, 2023. 24 p. (In Russian)
23. Gvozdev A.A., Dmitriev S.A., Krylov S.M. New about Steel Concrete Strength. Moscow: Stroyizdat, 1976. 272 p. (In Russian)
24. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R. Thrust Effect on Strength of Reinforced Concrete Beams on Yielding Supports under Dynamic Loading. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2023; (1): 5–16. (In Russian)
25. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R. Experimental Research of Reinforced Concrete Edge Supported Slabs with Spacers. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015; (3): 113–120. (In Russian)

26. Popov N.N., Rastorguev B.S. Calculation of Reinforced Concrete Structures for the Action of Short-Term Dynamic Loads. Moscow: Stroyizdat, 1964. 151 p. (In Russian)
27. Kumpyak O.G., Galyautdinov B.R. Numerical Calculation of Reinforced Concrete Beams with Spacing on Compliant Supports under Dynamic Load. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24 (5): 81–97. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-5-81-97 (In Russian)

Сведения об авторах

Кумпяк Олег Григорьевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, OGKumpyak@yandex.ru

Галютдинов Заур Рашидович, докт. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, GazR@yandex.ru

Галютдинов Дауд Рашидович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, DaudG@yandex.ru

Authors Details

Oleg G. Kumpyak, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, OGKumpyak@yandex.ru

Zaur R. Galyautdinov, DSc, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, GazR@yandex.ru

Daud R. Galyautdinov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, DaudG@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.06.2025
Одобрена после рецензирования 17.07.2025
Принята к публикации 03.09.2025

Submitted for publication 24.06.2025
Approved after review 17.07.2025
Accepted for publication 03.09.2025