УДК 624.012.042.8.001.2 DOI: 10.33979/2073-7416-2023-108-4-57-64

О.Г. КУМПЯК[1], З.Р. ГАЛЯУТДИНОВ[1], Д.Р. ГАЛЯУТДИНОВ[1]
[1]ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет» (ТГАСУ), г. Томск, Россия

ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ БАЛКИ С УЧЕТОМ РЕАКЦИИ РАСПОРА ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Аннотация. *В статье представлены результаты теоретических исследований железобетонных балок с учетом ограничения горизонтального смещения на опорах при кратковременном динамическом нагружении. В исследованиях деформирование конструкции рассмотрено в условно упругой и пластической стадиях. Установлено, что наличие распора приводит к значительному увеличению прочности и снижению деформативности конструкций, как условно упругой, так и пластической стадиях. В работе отражены результаты численного расчета железобетонных балочных конструкций с распором при кратковременном динамическом нагружении на основе полученных аналитических зависимостей. Рассмотрено влияние реакции распора, а именно жесткости опорного контура на коэффициент динамичности железобетонных конструкций по сравнению с конструкциями без распора. Результаты численных исследований свидетельствуют о положительном влиянии реакции распора в динамически нагруженных конструкциях на всех стадиях их динамического деформирования.*

Ключевые слова: *железобетонная балка, распор, кратковременная динамическая нагрузка, уравнение движения балки, функция динамичности, коэффициент динамичности.*

O.G. KUMPYAK[1], Z.R. GALYAUTDINOV[1], D.R. GALYAUTDINOV[1]
[1]Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB), Tomsk, Russia

REINFORCED CONCRETE BEAMS TAKING INTO ACCOUNT THE REACTION OF THE THRUST UNDER SHORT-TERM DYNAMIC LOADING

Abstract. *The article presents the results of theoretical studies of reinforced concrete beams, taking into account the limitation of horizontal displacement on supports under short-term dynamic loading. In studies, the deformation of the structure is considered in the conditionally elastic and plastic stages. It has been established that the presence of thrust leads to a significant increase in strength and a decrease in the deformability of structures, both in the conditionally elastic and plastic stages. The paper reflects the results of a numerical calculation of reinforced concrete beam structures with thrust under short-term dynamic loading based on the obtained analytical dependencies. The effect of the thrust reaction, namely the rigidity of the support contour, on the dynamic coefficient of reinforced concrete structures is considered in comparison with structures without expansion. The results of numerical studies indicate a positive effect of the expansion reaction in dynamically loaded structures at all stages of their dynamic deformation.*

Keywords: *reinforced concrete beam, thrust, short-term dynamic load, beam motion equation, dynamic function, dynamic coefficient.*

Введение

Сохранность зданий и сооружений в последнее время является основополагающим в связи с террористической угрозой, а также возникновением бытовых, природных и производственных чрезвычайных ситуаций, что может привести к значительным материальным затратам на частичное или полное восстановление зданий или сооружений.

© Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р., Галяутдинов Д.Р., 2023

В конструкциях, проектируемых на особые динамические воздействия [1-4] вследствие ограничения горизонтального перемещения на торцах изгибаемых элементов возникает реакция распора.

Имеющиеся экспериментально-теоретические исследования железобетонных изгибаемых элементов, посвящённые учету реакции распора [5-16] как при статическом, так и кратковременном динамическом нагружениях показывают, что ограничение горизонтального перемещения приводит к увеличению несущей способности и снижению прогибов балочных конструкций. В теоретических исследованиях, выполненных в работе [17] принято, что в условно упругой стадии влияние распора минимально и его влиянием на деформирование конструкции можно пренебречь. Однако экспериментальные исследования железобетонных балок с распором при кратковременном динамическом нагружении показывают, что распор возникает с первых этапов деформирования конструкции и приводит к увеличению момента образования трещин. Таким образом, для отражения картины влияния распора на напряженно-деформированное состояние железобетонных балочных конструкций при динамическом деформировании необходима разработка метода расчета, учитывающего возникновение и развитие реакции распора не только в пластической, но и в условно упругой стадии деформирования балки.

Целью теоретических исследований железобетонных балок с распором при однократном кратковременном динамическом нагружении является разработка метода расчета в условно упругой и пластической стадиях деформирования изгибаемых элементов, а также оценка влияния реакции распора на коэффициент динамичности балочных конструкции на соответствующей стадии работы.

Модели и методы

Предлагается шагово-итерационный метод расчета, который позволяет на каждом шаге учитывать влияние изменение угла поворота конструкции на возникновение и изменение реакции распора в процессе деформирования. Шаг по времени (s) определяется заданной точностью расчета функции динамичности вплоть до достижения ею максимального значения.

Рассмотрены однопролетные железобетонные балки с распором при кратковременном динамическом нагружении, равномерно распределенном по пролету. Для получения уравнения движения балки в условно упругой и пластической областях использован приближенный метод, основанный на задании формы прогибов конструкции.

Вариации прогиба (δy), кривизны балки ($\delta\chi$) и горизонтального смещения ($\delta\Delta$) примем равными

$$\delta y = \sin\left(\frac{\pi}{l}x\right), \tag{1}$$

$$\delta\chi = -\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{\pi^2}{l^2}\sin\left(\frac{\pi}{l}x\right), \tag{2}$$

$$\delta\Delta = \varphi\cdot z, \varphi = \frac{dF(x)}{dx}, \text{ при } x = 0, \tag{3}$$

где $F(x)$ – функция распределения перемещений, обусловленных деформированием балки; φ – угол поворота балки; z – расстояние от уровня приложения усилия распора до центра тяжести сжатой зоны бетона.

Величина распора $H_{j,s}(t)$ определяется следующим выражением

$$H_{j,s}(t) = \Delta H_{j,s}(t)/c \le H_{\max}, \tag{4}$$

где $\Delta H_{j,s}(t)$ – горизонтальное смещение на j-й стадии деформирования балки на текущем этапе расчета (s); c – горизонтальная податливость конструкции на опоре по направлению

реакции распора; $H_{\max}$ – величина максимальной величины распора обусловленная жесткостью ограничивающей конструкцией; $j = el, pl$ – индекс принимаемый в зависимости от стадии работы балки: условно упругая (el), пластическая (pl).

Для угла поворота балки справедлива следующая зависимость

$$\varphi_{j,s}(t) = \frac{dy_{j,s}(x,t)}{dx} \quad \text{при} \quad x = 0. \tag{5}$$

Для прогиба балки примем функцию перемещения в виде:

$$y_{j,s}(x,t) = pF(x)T_{j,s}(t), \tag{6}$$

где $T_{j,s}(t)$ – функция динамичности.

Функцию $F(x)$ для шарнирно опертой балки удовлетворяющую граничным условиям на концах балки, в зависимости от вида опорных соединений примем в виде

$$F(x) = \sin\left(\frac{\pi}{l}x\right). \tag{7}$$

Уравнение движения балки в условно упругой стадии ($j = el$) может быть получено из условия равенства нулю работ всех действующих сил на возможных перемещениях, то есть $\sum A = 0$. При этом учитывается работа сил инерции (ma) и распора ($H(t)$), а также изгибающих моментов на соответствующих перемещениях (см. рисунок 1).

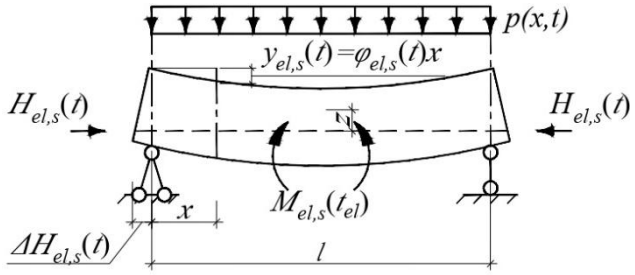

Рисунок 1 – Расчетная схема условно упругой балки (j=el) с распором

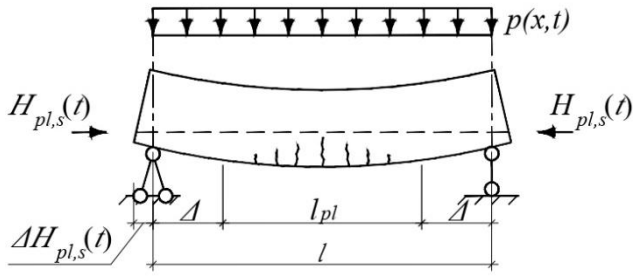

Рисунок 2 – Расчетная схема пластической балки (j=pl) с распором

Тогда уравнение работ действующих сил на возможных перемещениях запишется в виде

$$\int_0^l p(t)\delta y dx - \int_0^{l-\Delta} M_{el,s}\delta\chi dx - 2H_{el,s}(t)\delta\Delta - \int_0^l m\left(\ddot{y}_{el,s}(x,t)\right)\delta y dx = 0. \tag{8}$$

Подставив выражения (1)…(7) в (8), после преобразований получим уравнение движения балки с распором в условно-упругой стадии

$$\frac{d^2}{dt^2}T_{el,s}(t) + \omega_{H,el}^2 T_{el,s}(t) = \omega^2 p(t), \tag{9}$$

где $\omega_{H,el} = \sqrt{\omega^2 + k}$ – частота колебаний балки с распором; $k = \frac{4\pi^2 z^2}{cml^3}$ – коэффициент учитывающий податливость в горизонтальном направлении; $\omega = \frac{\pi^2}{l^2}\sqrt{\frac{B_{el}}{m}}$ – частота собственных колебания балки на жестких опорах; B_{el} – жесткость конструкции в условно упругой стадии с учетом трещин в бетоне; m – погонная масса конструкции; $p(t)$ – закон изменения нагрузки во времени.

Деформирование балки в пластической стадии происходит при достижении напряжениями в арматуре предела текучести (физического или условного) и сопровождается резким снижением жесткости конструкции. Условие перехода балки в пластическую стадию

имеет вид $M > M_{el} = M^{i}_{el,s}(t_{el})$, где M_{el} – изгибающий момент, соответствующий концу условно упругой стадии; t_{el} – время конца условно упругой стадии деформирования балки.

Расчет балки в пластической стадии выполнен с применением метода стационарных пластических зон, когда пластические деформации считаются развивающимися в пределах постоянной длины l_{pl} (см. рисунок 2). Участки балки Δ примыкающие к пластической зоне l_{pl} считаются жесткими дисками.

При пластическом деформировании балки ($j = pl$) справедливо выражение $M_{pl,s} = M_{el} + B_{pl}(\chi - \chi_{el})$ и уравнение работ действующих сил на возможных перемещениях примет вид

$$\int_0^l p(t)\delta y dx - \int_0^{l-\Delta} M_{pl,s}\delta\chi dx - 2H_{pl,s}(t)\delta\Delta - \int_0^l m\left(\ddot{y}_{pl,s}(x,t)\right)\delta y dx = 0. \qquad (10)$$

После преобразований уравнения (10) с учетом выражений (1)…(7) получим уравнение движения железобетонной балки с распором в пластической стадии

$$\frac{d^2}{dt^2}T_{pl,s}(t) + \omega^2_{H,pl}T_{pl,s}(t) = \omega^2(p(t) - k_{M1}), \qquad (11)$$

где $\omega_{H,pl} = \sqrt{\omega_2^2 + k}$; $\omega_2 = \frac{\pi^2}{l^2}\sqrt{\frac{B_{pl}}{m}\left(1 - \frac{2\Delta}{l} + \frac{1}{\pi}\sin\left(\frac{2\pi\Delta}{l}\right)\right)}$; $k_{M1} = \frac{\pi^2}{pl^2}M_{el}\left(1 - \frac{B_{pl}}{B_{el}}\right)\cos\left(\frac{\pi\Delta}{l}\right)$.

Изменение во времени в пределах шага расчета (s) описывается следующей зависимостью

$$p(t) = p_1 - \frac{(p_1 - p_2)}{(t_2 - t_1)}(t - t_1) = p_1 - \Delta p(t - t_1), \qquad (12)$$

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 начала и конца рассматриваемого временного интервала.

Решение полученных уравнений (9) и (11) для заданного закона изменения нагрузки (12) имеет вид (13), (14)

$$T_{el,s}(t) = \sin(\omega_{H,el}t)A_{el,s} - \cos(\omega_{H,el}t)B_{el,s} - \frac{\omega\,(\Delta p(t - t_1) - p_1)}{\omega^2_{H,el}}, \qquad (13)$$

$$T_{pl,s}(t) = \sin(\omega_{H,pl}t)A_{pl,s} - \cos(\omega_{H,pl}t)B_{pl,s} - \frac{\omega\,(\Delta p(t - t_1) - p_1 - k_{M1})}{\omega^2_{H,pl}}. \qquad (14)$$

Неизвестные константы $A_{el,s}$, $B_{el,s}$ и $A_{pl,s}$, $B_{pl,s}$ определяются исходя из начальных условий (15), (16), то есть равенства функции динамичности и ее первой производной значениям на предыдущем этапе расчета (*s-1*): $T_{j,s}(t) = T_{j,s-1}(t)$, $\dot{T}_{j,s}(t) = \dot{T}_{j,s-1}(t)$:

$$A_{el,s} = \frac{\omega^2_{H,el}\dot{T}_{el,s}(t) + \omega^2\Delta p}{\omega^3_{H,el}}, B_{el,s} = \frac{\omega^2_{H,el}T_{el,s}(t) - \omega^2\Delta p}{\omega^2_{H,el}}, \qquad (15)$$

$$A_{pl,s} = \frac{\omega^2_{H,pl}\dot{T}_{pl,s}(t) + \omega^2\Delta p}{\omega^3_{H,pl}}, B_{pl,s} = \frac{\omega^2_{H,pl}T_{pl,s}(t) - \omega^2(p_1 + k_{M1})}{\omega^2_{H,pl}}. \qquad (16)$$

Время достижения максимума $t_{\max}$ функцией динамичности $T_{j,s}(t)$ определяется из выражения $\dot{T}_{j,s}(t) = 0$. Тогда величина коэффициента динамичности балок с распором определяется выражением $k_{d,H} = T_{j,s}(t_{\max})$.

Результаты исследования и их анализ

С целью оценки влияния распора на прочность и деформативность железобетонных балок при кратковременном динамическом нагружении проведены численные исследования с использованием полученных аналитических зависимостей. Деформирование железобетонных балок рассмотрено в условно упругой ($j = el$) и упругопластической ($j = el...pl$) стадиях. Оценка распора выполнялась по параметру c_1, который физически представляет соотношение продольной жесткости балки к жесткости конструкции, препятствующей горизонтальному смещению, и определяется выражением $c_1 = cE_b bh_0 / l$.

При условно упругом деформировании балки (см. рисунок 3) для мгновенно нарастающей нагрузки влияние распора возрастает с увеличением $\omega\theta$ и снижением параметра c_1 до 40%. В случае воздействия постепенно нарастающей кратковременной динамической нагрузки на балку с ограничением горизонтального смещения наибольшее влияние на деформирование конструкции оказывает жесткость опорного контура, определяемая параметром $c_1 = 1.0$. При этом максимальное снижение коэффициента динамичности (до 53%) наблюдается в балках с распора по отношению к конструкциям без распора ($c_1 = \infty$) при величине $\omega\theta_1$ в интервале значений от 3 до 5.

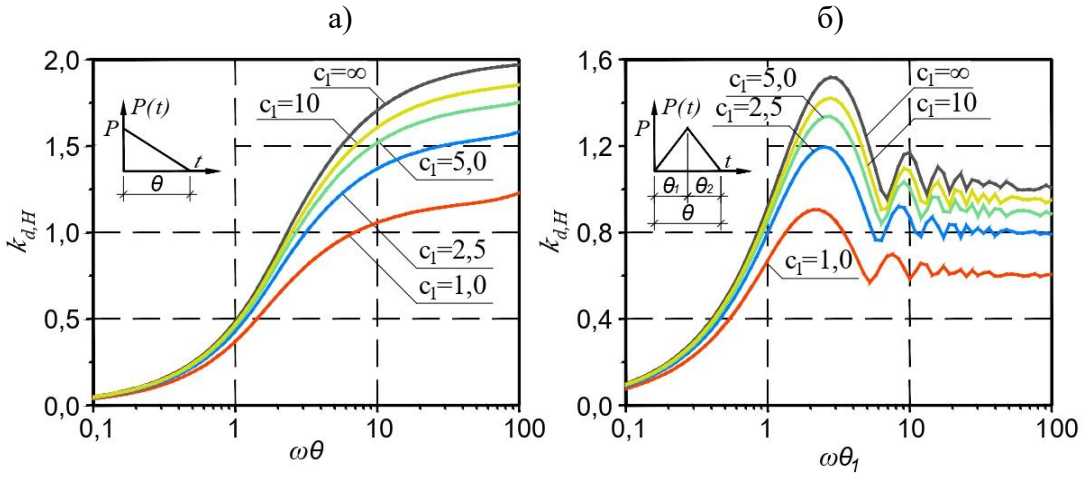

Рисунок 3 – Коэффициент динамичности $k_{d,H}$ для условно упругих балок с распором в зависимости от параметра c_1: а) мгновенно нарастающая нагрузка, б) постепенно нарастающая нагрузка

При работе конструкции в пластической стадии (см. рисунок 4) происходит сравнительно большее снижение коэффициента динамичности относительно конструкций, деформирующихся только в условно упругой стадии (см. рисунок 3), что объясняется увеличением деформативности балок и как следствие увеличение распорных усилий. Например, при наличии ограничительного контура, соответствующего параметру $c_1 = 1.0$ в балках под воздействием мгновенно нарастающей нагрузки прослеживается снижение коэффициента динамичности до 90% при $\omega\theta > 20$ (см. рисунок 4 *а*), а в случае действия постепенно нарастающей нагрузки (см. рисунок 4 *б*) снижение составляет 96% при $\omega\theta_1 = 8$. Стоит отметить, что при $\omega\theta_1 > 8$ соотношение θ_2 / θ_1 практически не влияет на величину $k_{d,H} / k_d$.

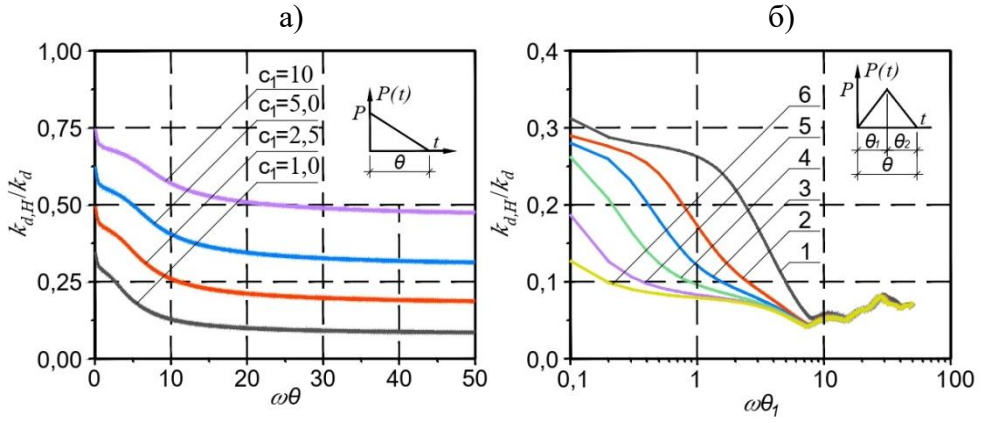

Рисунок 4 – Изменение $k_{d,H}/k_d$ в зависимости от $\omega\theta(\omega\theta_1)$ железобетонных балок с распором: а) при действии мгновенно нарастающей нагрузки в зависимости от c_1, б) при действии постепенно нарастающей нагрузки при c_1=1 в зависимости от соотношения (θ_2/θ_1):
1 – θ_2/θ_1=1, 2 – θ_2/θ_1=5; 3 – θ_2/θ_1=10; 4 – θ_2/θ_1=20; 5 – θ_2/θ_1=50; 6 – θ_2/θ_1=100

Помимо вышеизложенного на эффективность распора оказывает влияние время перехода конструкции из условно упругой в пластическую стадию – t_{el} (см. рисунок 5). Не зависимо от вида приложенной динамической нагрузки максимальное снижение коэффициента динамичности происходит со снижением времени перехода балки в пластическую стадию t_{el}.

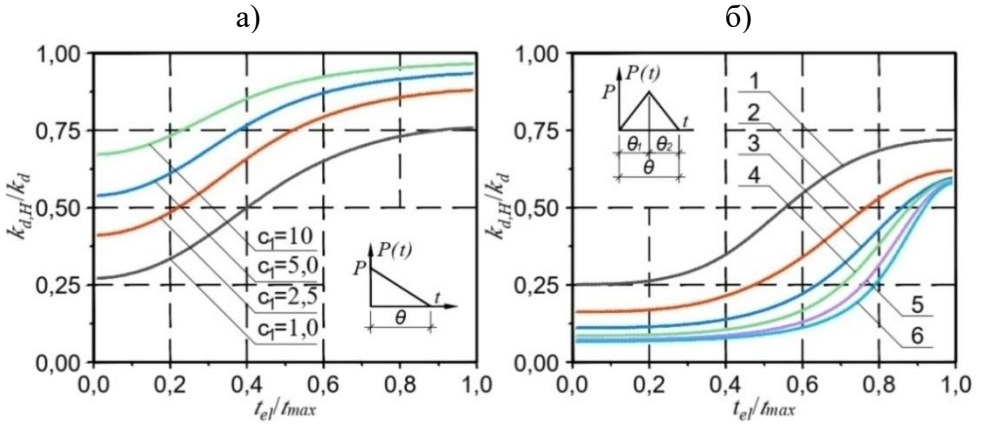

Рисунок 5 – Изменение $k_{d,H}/k_d$ в зависимости от t_{el}/t_{max} железобетонных балок с распором: а) при действии мгновенно нарастающей нагрузки в зависимости от c_1, б) при действии постепенно нарастающей нагрузки при c_1=1 в зависимости от соотношения (θ_2/θ_1):
1 – θ_2/θ_1=1, 2 – θ_2/θ_1=5; 3 – θ_2/θ_1=10; 4 – θ_2/θ_1=20; 5 – θ_2/θ_1=50; 6 – θ_2/θ_1=100

Выводы

Разработан численно-аналитический метод, позволяющий рассчитывать изгибаемые железобетонные конструкции с учетом реакции распора при действии кратковременной динамической нагрузки. На основе полученных зависимостей произведены численные исследования, по результатам которых установлено, что учет реакции распора в условно упругой стадии позволяет снизить коэффициент динамичности до 53%. При деформировании балки в пластической стадии распор оказывает большее влияние на прочность и деформативность конструкции по сравнению с работой в условно упругой стадии, при этом во многом влияние определяется временем перехода конструкции из условной упругой в пластическую стадию.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тонких Г.П., Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р. Особенности проектирования убежищ гражданской обороны с податливыми опорами в виде сминаемых вставок кольцевого сечения // Технологии гражданской безопасности. 2022. № 19. С. 25-30.

2. Трекин Н.Н. Учет податливости узловых сопряжений в железобетонных конструктивных системах // Вестник. ВНИИЖТа. 2003. № 5. С. 27-29.

3. Краснощеков Ю.В., Комлев А.А. Распорность элементов конструктивных систем как случайное явление // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2014. № 1(35). С. 45-49.

4. 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. 2022. № 5(304). С. 33-41.

5. Гвоздев А.А., Дмитриев С.А., Крылов С.М. Новое о прочности железобетона. Москва: Стройиздат, 1976. 272 с.

6. Дербенцев И.С., Карякин А.А. Метод определения усилия распора при сдвиге монолитных шпоночных межпанельных вертикальных стыков // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 1. С. 257-257.

7. Зайцев Л.Н. Влияние распора на распределение усилий, несущую способность и деформативность статически неопределимых железобетонных балок // Трещиностойкость и деформативность обычных и предварительно напряженных железобетонных конструкций: сб. трудов НИИЖБ. Москва: Стройиздат, 1965. С. 137-168.

8. Корсун В.И., Недорезов А.В., Виноградова Т.Н. Влияние распора на несущую способность железобетонных балок // Лолейтовские чтения – 150 – Москва: Издательство МИСИ-МГСУ, 2018. С. 180-186.

9. Кузнецов В.С., Шапошникова Ю.А. Прочность преднапряженного монолитного безбалочного перекрытия в стадиях изготовления и разрушения // Системные технологии. 2016. № 1(18). С. 89-92.

10. Кумпяк О.Г., Галяутдинов З.Р. Экспериментальные исследования опертых по контуру железобетонных плит с распором // Вестник ТГАСУ. 2015. № 3. С. 113-120.

11. Кумпяк О.Г., Галяутдинов Д.Р. Экспериментальные исследования железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении. Вестник ТГАСУ. 2021. № 23(6). С. 143-156.

12. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Расчет железобетонных конструкций на действие кратковременных динамических нагрузок. Москва: Стройиздат, 1964. 151 с.

13. Тихонов И.Н. Принципы расчета прочности и конструирования армирования балок перекрытий зданий из монолитного железобетона для предотвращения прогрессирующего разрушения // Научно-технический и производственный журнал «Жилищное строительство». 2013. № 2. С. 40-45.

14. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R. Experimental study of beams on yielding supports with thrust // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 143. doi:10.1051/1.4973016.

15. Huynh L., Foster S., Valipour H., Rendall R. High strength and reactive powder concrete columns subjected to impact: Experimental investigation // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 78. Pp. 153-171.

16. Christiansen, K. P. The effect of membrane stresses on the ultimate strength of the interior panel in a reinforced concrete slab // The Structural Engineer. 1963. Vol. 41. No. 8. Pp. 261–265.

17. Виноградова Т.Н. Влияние распора на работу железобетонных балочных конструкций при кратковременных динамических воздействиях: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1977. 155 с.

REFERENCES

1. Tonkikh G.P., Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R. Osobennosti proyektirovaniya ubezhishch grazhdanskoy oborony s podatlivymi oporami v vide sminayemykh vstavok kol'tsevogo secheniya // Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti. 2022. No. 19. Pp. 25-30. (rus)

2. Trekin N.N. Uchet podatlivosti uzlovykh sopryazheniy v zhelezobetonnykh konstruktivnykh sistemakh // Vestnik. VNIIZHTa. 2003. No. 5. Pp. 27-29. (rus)

3. Krasnoshchekov YU.V., Komlev A.A. Raspornost' elementov konstruktivnykh sistem kak slu-chaynoye yavleniye // Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-dorozhnoy akademii. 2014. No. 1(35). Pp. 45-49. (rus)

4. Galyautdinov Z.R., Kumpyak O.G., Galyautdinov D.R., Shipilova Ye.V. Dinamicheskiy raschet zhelezobetonnykh balok na podatlivykh oporakh za predelami uprugosti // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. 2022. No. 5(304). Pp. 33-41. (rus)

5. Gvozdev A.A., Dmitriyev S.A., Krylov S.M. Novoye o prochnosti zhelezobetona. Moskva: Stroyizdat, 1976. 272 p. (rus)

6. Derbentsev I.S., Karyakin A.A. Metod opredeleniya usiliya raspora pri sdvige monolitnykh shponochnykh mezhpanel'nykh vertikal'nykh stykov // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. No. 1. Pp. 257-257. (rus)

7. Zaytsev L.N. Vliyaniye raspora na raspredeleniye usiliy, nesushchuyu sposobnost' i deforma-tivnost' staticheski neopredelimykh zhelezobetonnykh balok // Treshchinostoykost' i deformativnost' obychnykh i predvaritel'no napryazhennykh zhelezobetonnykh konstruktsiy: sb. trudov NIIZHB. Moskva: Stroyizdat, 1965. Pp. 137-168. (rus)

8. Korsun V.I., Nedorezov A.V., Vinogradova T.N. Vliyaniye raspora na nesushchuyu sposobnost' zhelezobetonnykh balok // Loleytovskiye chteniya – 150 – Moskva: Izdatel'stvo MISI-MGSU, 2018. Pp 180-186. (rus)

9. Kuznetsov V.S., Shaposhnikova YU.A. Prochnost' prednapryazhennogo monolitnogo bezbaloch-nogo perekrytiya v stadiyakh izgotovleniya i razrusheniya // Sistemnyye tekhnologii. 2016. No. 1(18). Pp. 89-92. (rus)

10. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R. Eksperimental'nyye issledovaniya opertykh po konturu zhe-lezobetonnykh plit s rasporom // Vestnik TGASU. 2015. No. 3. Pp. 113-120. (rus)

11. Kumpyak O.G., Galyautdinov D.R. Eksperimental'nyye issledovaniya zhelezobetonnykh balok s rasporom na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii. Vestnik TGASU. 2021. No. 23(6). Pp. 143-156. (rus)

12. Popov N.N., Rastorguyev B.S. Raschet zhelezobetonnykh konstruktsiy na deystviye kratkovre-mennykh dinamicheskikh nagruzok. Moskva: Stroyizdat, 1964. 151 p. (rus)

13. Tikhonov, I.N. Printsipy rascheta prochnosti i konstruirovaniya armirovaniya balok pere-krytiy zdaniy iz monolitnogo zhelezobetona dlya predotvrashcheniya progressiruyushchego razrusheniya // Nauchno-tekhnicheskiy i proizvodstvennyy zhurnal «Zhilishchnoye stroitel'stvo». 2013. No. 2. Pp. 40-45. (rus)

14. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R. Experimental study of beams on yielding supports with thrust // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 143. doi:10.1051/1.4973016.

15. Huynh L., Foster S., Valipour H., Rendall R. High strength and reactive powder concrete columns subjected to impact: Experimental investigation // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 78. Pp. 153-171.

16. Christiansen K.P. The effect of membrane stresses on the ultimate strength of the interior panel in a reinforced concrete slab // The Structural Engineer. 1963. Vol. 41. No. 8. Pp. 261–265.

17. Vinogradova T.N. Vliyaniye raspora na rabotu zhelezobetonnykh balochnykh konstruktsiy pri kratkovremennykh dinamicheskikh vozdeystviyakh: Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Moskva, 1977. 155 p. (rus)

Информация об авторах:

Кумпяк Олег Григорьевич
ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск, Россия,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры железобетонные и каменные конструкции.
E-mail: OGKumpyak@yandex.ru

Галяутдинов Заур Рашидович
ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск, Россия,
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой железобетонные и каменные конструкции.
E-mail: GazR@yandex.ru

Галяутдинов Дауд Рашидович
ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск, Россия,
ассистент кафедры железобетонные и каменные конструкции.
E-mail: DaudG@yandex.ru

Information about authors:

Kumpyak Oleg G.
Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia,
doctor in technical sciences, professor, professor of the department of reinforced concrete and stone structures.
E-mail: OGKumpyak@yandex.ru

Galyautdinov Zaur R.
Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia,
doctor in technical sciences, docent, head of the department of reinforced concrete and stone structures.
E-mail: GazR@yandex.ru

Galyautdinov Daud R.
Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia,
assistant of the department of reinforced concrete and stone structures.
E-mail: DaudG@yandex.ru