

УДК 624.012.042.8.001.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-6-143-156

*О.Г. КУМПЯК, Д.Р. ГАЛЯУТДИНОВ,**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК С РАСПОРОМ НА ПОДАТЛИВЫХ ОПОРАХ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

При проектировании железобетонных балочных конструкций с ограничением горизонтального смещения на опорах при кратковременном динамическом нагружении необходимо учитывать возникновение реакции распора. Наличие распора приводит к значительному увеличению прочности и трещиностойкости конструкций, а при использовании податливых опор к повышению их энергоемкости.

Целью экспериментального исследования является изучение целесообразности применения податливых опор в распорных динамически нагруженных конструкциях.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований железобетонных балочных конструкций с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении. Рассмотрено влияние податливых опор на прочность, деформативность и трещиностойкость железобетонных конструкций с распором.

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о положительном эффекте применения податливых опор в динамически нагруженных конструкциях с распором.

**Ключевые слова:** железобетонная балка; податливая опора; распор; кратковременная динамическая нагрузка; опорная реакция; перемещения; ускорения.

**Для цитирования:** Кумпяк О.Г., Галяутдинов Д.Р. Экспериментальные исследования железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 6. С. 143–156.

DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-6-143-156

*O.G. KUMPYAK, D.R. GALYAUTDINOV,**Tomsk State University of Architecture and Building*

## **REINFORCED CONCRETE BEAMS ON YIELDING SUPPORTS WITH THRUST UNDER DYNAMIC LOAD**

Reinforced concrete beam with limited horizontal displacement on yielding supports under dynamic loading require considering the thrust response. The thrust presence significantly increases the beam strength and crack resistance. The use of yielding supports increases their energy intensity. The purpose of the paper is the experimental study of using yielding supports under the dynamic load conditions. The experimental results concern the reinforced concrete beam with yielding supports with a thrust under the dynamic load. The paper shows the effect from yielding supports on the strength, deformability, and crack resistance of reinforced concrete beams. The obtained results indicate to a positive effect from the use of yielding supports of the beam under the dynamic load.

**Keywords:** reinforced concrete beam; yielding support; thrust; dynamic load; thrust response; displacement; acceleration.

**For citation:** Kumpyak O.G., Galyautdinov D.R. Eksperimental'nye issledovaniya zhelezobetonnykh balok s rasporom na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom

dinamicheskom nagruzhenii [Reinforced concrete beams on yielding supports with thrust under dynamic load]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2021. V. 23. No. 6. Pp. 143–156.  
DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-6-143-156

Вследствие непрерывного развития химической, нефтяной, газовой и других отраслей промышленности увеличивается вероятность возникновения и воздействия на конструкции зданий и сооружений случайных кратковременных динамических нагрузок большой интенсивности. Сооружения, проектируемые на особые динамические воздействия, часто возводятся из сборного и сборно-монолитного железобетона по рамной и рамно-связевой конструктивным схемам. Для стыков сборных элементов по ряду причин имеет место их горизонтальная и вертикальная податливость. При этом в изгибаемых конструкциях вследствие ограничения горизонтального смещения в опорных закреплении возникает реакция распора.

Результаты экспериментально-теоретических исследований [1–6] показывают, что явление распора приводит к повышению несущей способности изгибаемых железобетонных конструкций и достаточно хорошо изучено при статическом нагружении. При однократном кратковременном динамическом нагружении действие распора на работу конструкции неоднозначно. С одной стороны, действие распора повышает несущую способность конструкции, с другой – понижается ее деформативность. Снижение деформативности отрицательно сказывается на пластических свойствах железобетонной конструкции и часто приводит к уменьшению ее динамической прочности.

Экспериментально-теоретические исследования железобетонных конструкций при интенсивном динамическом воздействии при их вертикальной податливости на опорах отражены в работах отечественных [7–12] и зарубежных [13–16] ученых. Установлено, что одним из эффективных способов повышения сопротивления конструкций указанным воздействиям является применение податливых опор. При этом степень снижения динамической реакции определяется упругопластическими свойствами податливой опоры и соотношением жесткостей опоры и конструкции.

С целью экспериментальной оценки напряженно-деформированного состояния железобетонных балочных конструкций на податливых опорах с распором при кратковременном динамическом нагружении разработана и реализована программа исследований (таблица). Было запроектировано и изготовлено 14 опытных конструкций. Отличие между конструкциями: в характере нагружения (статическое или кратковременное динамическое), наличии или отсутствии распора и характере деформирования податливых опор (упругопластическая, упругопластическая с отвердением). В таблице приняты следующие обозначения: «Б» – железобетонная балка; «С» – статическая нагрузка; «Д» – динамическая нагрузка; «Р» – наличие распора; «П» – наличие податливых опор, деформирующихся в упругопластической стадии «у» или упругопластической с отвердением «о»; «1...14» – порядковый номер конструкции. Например, конструкция «БДРПо-6» расшифровывается как балка «Б»,

подверженная динамическому нагружению «Д» с учетом ограничения горизонтального смещения «Р» на податливых опорах «П», деформируемых в стадии отвердения «о» под номером 6.

### Программа экспериментальных исследований

Характер нагрузки	Статика		Кратковременное динамическое нагружение											
Наличие распора	–	+	–	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Тип опор	Жесткие опоры					Податливые опоры								
Стадия работы податливых опор	–	–	–	–	–	Отвердение	Отвердение	Упругопластическая	Упругопластическая	Упругопластическая	Отвердение	Упругопластическая	Упругопластическая	Упругопластическая
Длина податливых опор $l$ , мм	–	–	–	–	–	20	40	60	80	100	50	100	160	180
Шифр образца	БС-1	БСР-2	БД-3	БДР-4	БДР-5	БДРПо-6	БДРПо-7	БДРПу-8	БДРПу-9	БДРПу-10	БДРПо-11	БДРПу-12	БДРПу-13	БДРПу-14
Кол-во	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Образцы приняты прямоугольного сечения размером 150×220 мм и длиной 1900 мм. Бетон тяжелый класса В35. Армирование опытных конструкций выполнялось пространственным каркасом. Армирование нижней зоны балок осуществлялось из горячекатаной стержневой арматуры класса А500с 2Ø10, верхней зоны – из арматуры класса А240 2Ø6. Поперечное армирование выполнено из вязаных хомутов холоднодеформируемой арматурной стали Ø5 Вр500, установленных с шагом 50 мм в приопорной зоне и 130 мм в середине пролета. Для усиления торцевых участков балок использованы сетки с ячейкой 50×50 мм из холоднодеформированной арматуры Ø5 мм класса Вр500 по 7 секток с каждой стороны и установлены уголки 100×10 мм (рис. 1).

На образцах был размещен комплекс измерительных приборов (рис. 2): для определения перемещений балки и смятия податливых опор – индуктивные датчики положения Waycon серии RL150 и RL50 соответственно; для измерения ускорений – акселерометры (DHE 100023); для определения реакции системы – датчик силоизмерительный тензорезисторный ДСТ 4126 и для опреде-

ления величины опорных реакций – динамометрические опоры (патент РФ на полезную модель № 161908). Приборы были подключены к ЭВМ Mic-036R и Mic-400D. Для определения величины распора на тяжи были наклеены тензорезисторы с базой 50 мм. Визуализация картины развития трещин в процессе кратковременного динамического нагружения выполнена с применением высокоскоростной камеры с частотой съемки 2500 кад/с (Photron Fastcam SA-2).

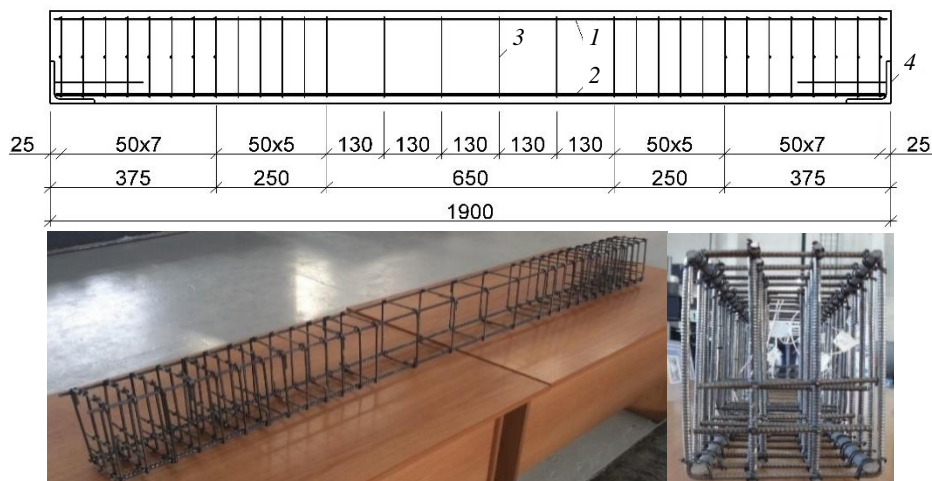


Рис. 1. Схема армирования железобетонных конструкций: арматура  $\varnothing 6$  мм класса А240 (1); арматура  $\varnothing 10$  мм класса А500с (2); арматура  $\varnothing 5$  мм класса Вр 500 (3); равнополочный уголок  $100 \times 10$  мм (4)

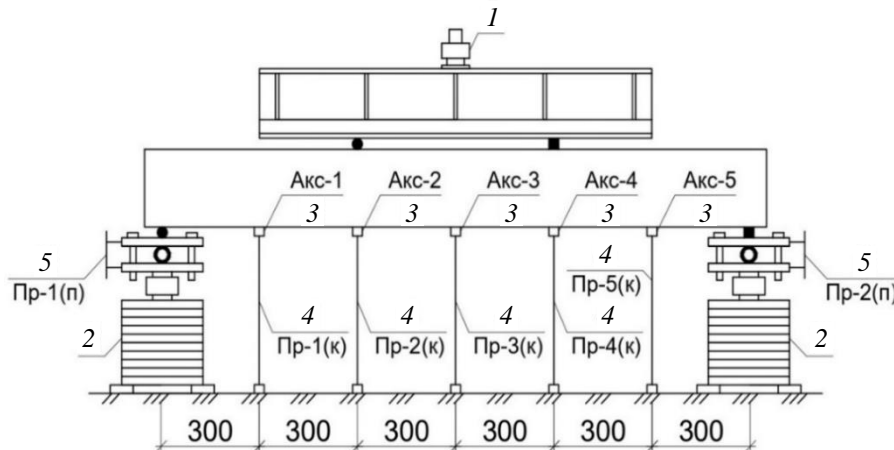


Рис. 2. Схема расположения измерительных приборов: силонизмерительная установка ДСТ-4126 (1); динамометрическая опора (патент РФ № 176603) (2); акселерометр (DHE 100023) (3); датчики перемещения Waycon серии RL150 (4); датчики перемещения Waycon серии RL50 (5)

Исследования опытных конструкций на статическую нагрузку проводились на испытательном стенде (рис. 3). Конструкции рассматривались как бал-

ки, свободно лежащие на опорах. Распор создавался при помощи ограничительного контура, состоящего из торцевых траверс, соединенных между собой двумя тяжами диаметром 60 мм. Траверсы упирались в торцы балок с возможностью поворота через две пластины и трубу сплошного сечения между ними (рис. 4). В пластинах были предусмотрены фрезерованные пазы. Перед испытанием создавалось начальное обжатие в уровне расположения растянутой арматуры при помощи установленного домкрата с торца траверсы, затем ограничительный контур фиксировался при помощи гаек, накручиваемых на тяжах. Величина предварительного обжатия принималась по результатам статических испытаний и составляла 5...10 % от  $H_{\max}$ . При статическом нагружении сосредоточенная нагрузка на опытные конструкции прикладывалась поэтапно через распределительную траверсу, с величиной нагрузки на каждом этапе 4 кН. Нагрузка задавалась с помощью гидравлического домкрата ДГ-25.

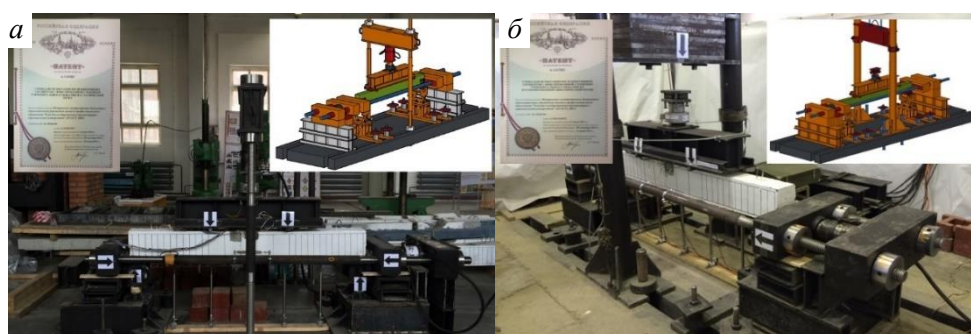


Рис. 3. Стенды для испытания балок с распором на жестких опорах при статическом нагружении (а) и при кратковременном динамическом нагружении на податливых опорах (б). Патенты на полезную модель РФ № 148401 и № 147262



Рис. 4. Узел сопряжения железобетонной балки и торцевой траверсы: траверса (1); железобетонная балка (2); металлическая пластина (3); труба сплошного сечения (4)

Кратковременная динамическая нагрузка на конструкцию прикладывалась через распределительную траверсу (рис. 3). По закрепленным направляющим сбрасывался груз массой 450 кг с высоты, определенной расчетом, составляющей 750 и 1150 мм. Высота 750 мм назначалась для шарнирно опертой конструкции БД-3 без распора и податливых опор, доводимой до полного разрушения. С целью оценки влияния распора на прочность и деформативность при высоте падения груза 750 мм также испытана конструкция БДР-4.

Для работы конструкции в упругопластической стадии при условии ограничения её горизонтального смещения на опорах высота падения груза составляла 1150 мм (БДР-5). В дальнейшем испытания проводились при варьировании жесткости податливых опор с целью сопоставления результатов с опытными данными, полученными для образцов БД-3 и БДР-5, при высотах падения 750 и 1150 мм соответственно.

**Статика.** Согласно программе экспериментальных исследований (табл. 1), при статической нагрузке было испытано два образца: без распора (БС-1) и с распором (БСР-2). Получены диаграммы деформаций арматуры, бетона и тяжей, а также перемещения конструкции в зависимости от нагрузки (рис. 5 и 6).

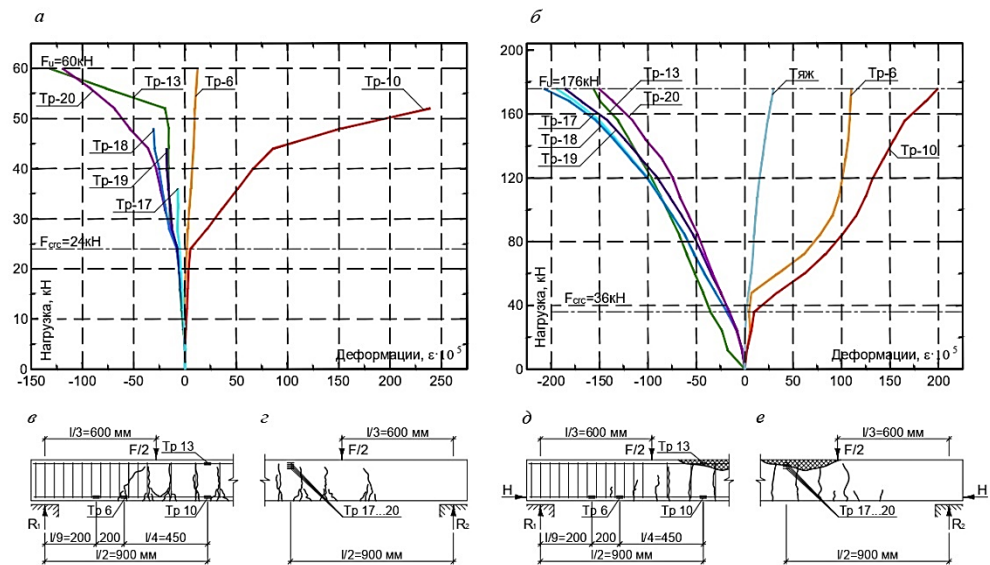


Рис. 5. Диаграммы развития деформаций арматуры и бетона: балки БС-1 при статическом нагружении (а); схема расположения тензорезисторов на арматуре и бетоне, картина трещинообразования (в, г); балки БСР-2 с распором при статическом нагружении (б); схема расположения тензорезисторов на арматуре и бетоне, картина трещинообразования (д, е)

В результате статических испытаний для шарнирно опертой балки без распора БС-1 разрушающая нагрузка составила  $F_u = 60$  кН, а для балки с распором БСР-2  $F_u = 176$  кН, увеличение несущей способности составило 2,93 раза, при этом максимальные прогибы снизились на 235 % (рис. 6). По развитию прогибов видно, что ограничение горизонтального смещения влияет на прогиб конструкции с начальных этапов нагружения. Появление первых трещин в балке без распора отмечено при нагрузке  $F_{crc} = 24$  кН, а с распором  $F_{crc} = 36$  кН (рис. 5), что свидетельствует о снижении деформаций конструкции с распором. Рассматривая деформации тяжей, можно видеть, что распор в конструкции возникает с первых этапов нагружения. Значительное увеличение распора наблюдается после раскрытия первых трещин. При этом рост распорных усилий в процессе нагружения имеет нелинейный характер. По схемам разрушения образцов и развитию трещин видно, что наличие распора



приводит к повышению трещиностойкости в балках, разрушение происходит по бетону сжатой зоны, при этом напряжения в растянутой арматуре достигли физического предела текучести (рис. 5 и 6).

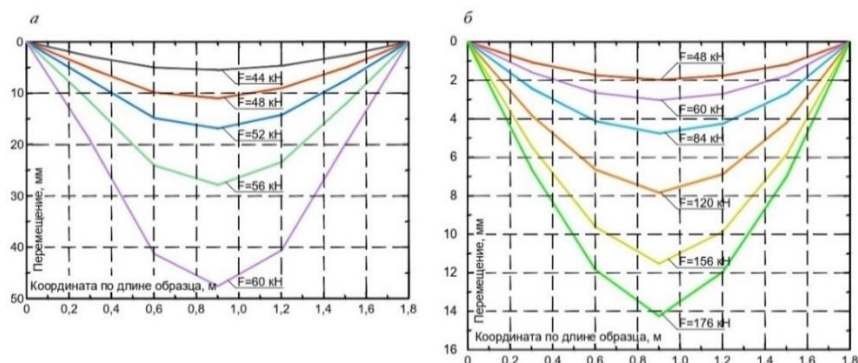


Рис. 6. Перемещения балки БС-1(а) и БСР-2(б) при статическом нагружении

**Динамика. Жесткие опоры.** Результаты испытания образцов БД-3, БДР-4, БДР-5 на жестких опорах представлены на рис. 7.

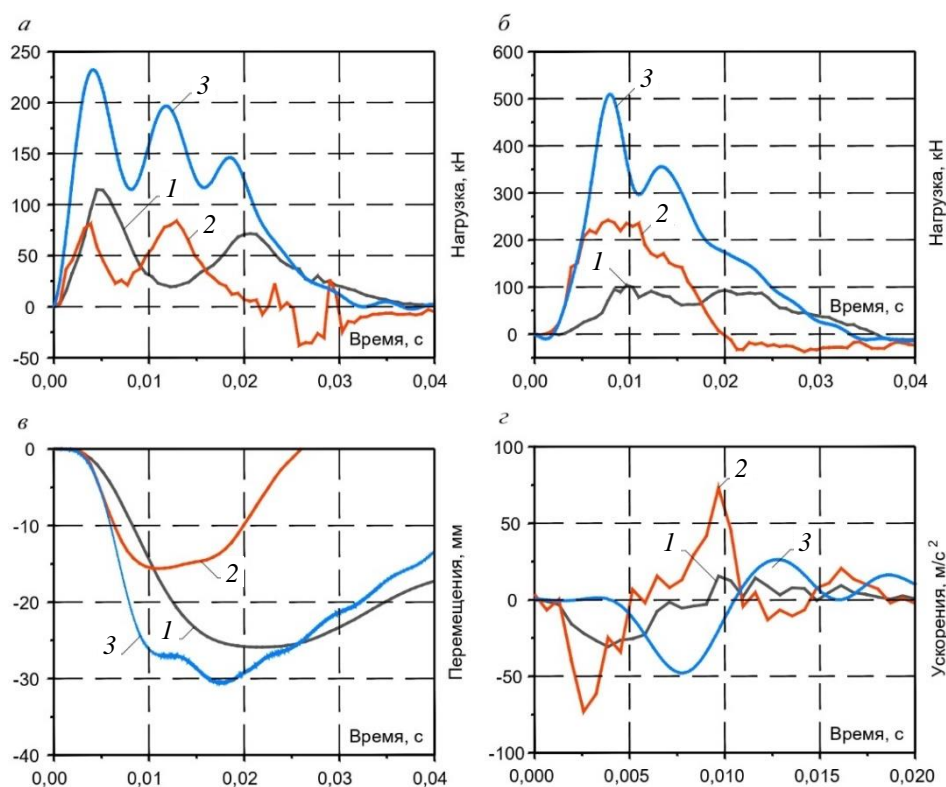


Рис. 7. Диаграммы изменения во времени реакций системы (а), опорных реакций (б), перемещений (в) и ускорений (г) по результатам испытаний железобетонных балок БД-3(1), БДР-4(2), БДР-5(3) на жестких опорах при динамическом нагружении

Наблюдается запаздывание по времени опорных реакций и включение в работу арматуры и бетона на величину 0,003 с. Конструкции БД-3 и БДР-5 доведены до пластической стадии. Силы инерции начинают развиваться на первоначальном этапе в момент нарастания реакции системы. При максимальном значении реакции системы наблюдается наибольшее значение силы инерции. Происходит снижение прогибов, количества и ширины раскрытия трещин балки БДР-4 по отношению к образцу БД-3 за счет наличия распора при одинаковом уровне нагружения. Для образца БДР-5, высота падения груза для которого составляла 1150 мм, динамическая реакция увеличилась в 2 раза по отношению к образцу БД-3 при равных перемещениях. Наличие распора приводит к более ранним пиковым значениям измеряемых параметров.

В результате испытания образца БДР-5 в предельном состоянии установлено одновременно с достижением в растянутой арматуре физического предела текучести хрупкое разрушение бетона сжатой зоны. Реакция конструкции на динамическое воздействие жестче. Реакция балки на внешнее воздействие БДР-5 в два раза больше, чем балки БДР-4. Для конструкции БДР-4 при наличии ограничения горизонтального смещения наблюдается значительное снижение трещинообразования (рис. 8).



Рис. 8. Картина развития трещин в момент достижения максимальных перемещений железобетонных балок БД-3(а), БДР-4(б), БДР-5(в) на жестких опорах при кратковременном динамическом нагружении

**Динамика. Податливые опоры. Высота падения груза 750 мм.** На упругопластических податливых опорах с отвердением выполнены испытания двух балок с распором – БДРПо-6, БДРПо-7 (рис. 9, 10). По результатам испытания конструкции БДРПо-6 установлено снижение опорной реакции относительно БДР-4 на 40 % и увеличение момента времени достижения её максимального значения с  $t = 0,009$  с до  $t = 0,0175$  с. По перемещениям податливых опор (рис. 9, з) установлено время перехода опоры в пластическую стадию  $t = 0,005$  с и отвердения  $t_{sy\_el} = 0,0125$  с. Причем при переходе опоры в стадию отвердения возникает резкий рост опорной реакции за счет снижения деформативности сминаемых вставок и увеличения инерционных сил.

Наблюдается снижение максимального перемещения конструкции (рис. 9, б). Для образца БДРПо-7 установлено снижение опорной реакции относительно БДР-4 на 50 % и увеличение момента времени достижения её максимального значения с  $t = 0,009$  с до  $t = 0,021$  с. То есть конструкция работает более пластично, а податливые опоры повышают энергоемкость системы. По перемещениям податливых опор установлено время перехода опоры в пластическую стадию  $t = 0,005$  с и отвердения  $t_{sy\_pl} = 0,016$  с. В момент времени  $t = 0,02$  с возникает резкий рост опорной реакции за счет снижения деформативности сминаемых вставок и увеличения инерционных сил при остановке



конструкции в связи с полным снятием податливых опор. Происходит снижение максимального перемещения конструкции (рис. 9, б) на 68 % относительно образца БД-3, на 81 % относительно образца БД-3. Таким образом, сравнивая процесс динамического деформирования образцов БДРПо-6 и БДРПо-7 с БДР-4, можем наблюдать эффект по параметрам динамического деформирования конструкций: снижение опорной реакции, время достижения максимальных значений опорных реакций увеличивается в 2 раза. Зона трещинообразования ограничена, а ширина раскрытия трещин незначительна.

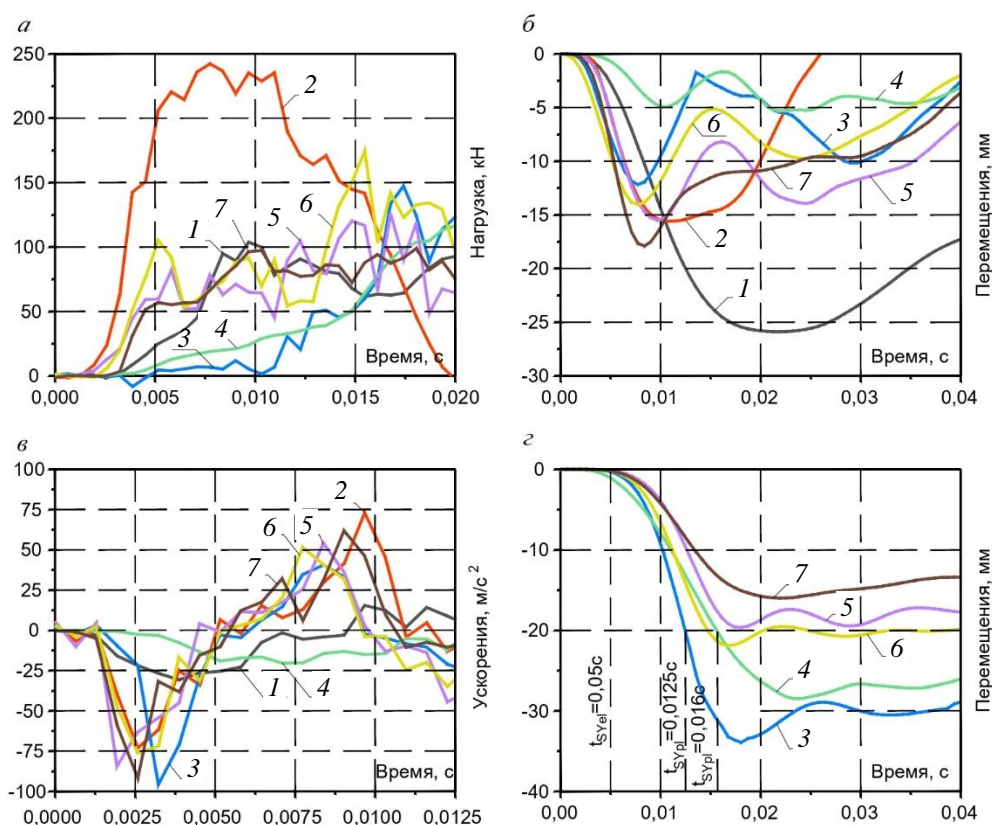


Рис. 9. Диаграммы изменения во времени опорных реакций (а), перемещений образцов (б), ускорений (в) и деформации податливых опор (г) по результатам испытаний железобетонных балок БД-3 (1), БДР-4 (2), БДРПо-6 (3), БДРПо-7 (4), БДРПу-8 (5), БДРПу-9 (6), БДРПу-10 (7) при динамическом нагружении



Рис. 10. Картина развития трещин в момент достижения максимальных перемещений железобетонных балок БДРПо-6 (а), БДРПо-7 (б), БДРПу-8 (в), БДРПу-9 (г), БДРПу-10 (д) при кратковременном динамическом нагружении

На упругопластических податливых опорах выполнены испытания трех балок с распором – БДРПу-8, БДРПу-9, БДРПу-10 (рис. 9 и 10). Установлено снижение опорной реакции для образца БДРПу-8 относительно БДР-4 на 40 % и увеличение момента времени достижения максимального значения с  $t = 0,009$  с до  $t = 0,017$  с. Время перехода опоры в пластическую стадию  $t_{SY\_el} = 0,007$  с. Наблюдается снижение максимального перемещения конструкции на 38 % относительно образца БД-3. Относительно же образца БДР-4 перемещения конструкции не изменились, но время достижения максимального значения сократилось. При этом опоры остановились на границе перехода в стадию отвердения. Конструкция БДРПу-9 имеет снижение опорной реакции относительно БДР-4 на 54 % и увеличение момента времени достижения её максимального значения с  $t = 0,009$  с до  $t = 0,015$  с. По перемещениям податливых опор установлено время перехода опоры в пластическую стадию  $t_{SY\_el} = 0,006$  с. Наблюдается снижение максимального перемещения конструкции на 40 % относительно образца БД-3. Относительно же образца БДР-4 перемещения конструкции не изменились, но время достижения максимального значения сократилось. По результатам испытания конструкции БДРПу-10 зафиксировано снижение опорной реакции относительно БДР-4 на 60 % и увеличение момента времени достижения максимального значения с  $t = 0,009$  с до  $t = 0,018$  с. Время перехода опоры в пластическую стадию  $t_{SY\_el} = 0,0065$  с. Наблюдается снижение максимального перемещения конструкции (рис. 9, б) на 30 % относительно образца БД-3, а относительно образца БДР-4 на 13 %.

**Динамика. Податливые опоры. Высота падения груза 1150 мм.** Ниже представлены данные по испытаниям конструкций с распором на податливых опорах при высоте падения груза, равной 1150 мм. По результатам испытания конструкции БДРПо-11 (рис. 11, 12) установлено снижение опорной реакции относительно БДР-5 в 2,5 раза и увеличение момента времени достижения максимального значения с  $t = 0,008$  с до  $t = 0,0175$  с. Время перехода опоры в пластическую стадию  $t_{SY\_el} = 0,007$  с, и отвердения  $t_{SY\_pl} = 0,0135$  с (рис. 11, з). При переходе опоры в стадию отвердения наблюдается резкий рост опорной реакции (рис. 11, а) за счет снижения деформативности сминаемых вставок и увеличения инерционных сил при остановке конструкции в связи с полным смятием податливых опор. Происходит снижение максимального перемещения конструкции на 35 % относительно образца БДР-5.

Испытания конструкции БДРПу-12 показали снижение опорной реакции относительно БДР-5 на 80 % и уменьшение момента времени достижения максимального значения с  $t = 0,004$  с до  $t = 0,023$  с. Время перехода опоры в пластическую стадию  $t_{SY\_el} = 0,007$  с. Наблюдается снижение максимального перемещения конструкции на 27 % относительно образца БДР-5. Активно включаются в процесс деформирования податливые опоры, снижаются деформации, а распор растёт, т. е. ограничение горизонтального смещения опорных сечений препятствует росту прогибов, увеличивается время сопротивления и пластическая стадия деформирования конструкции. Образец БДРПу-13 позволил установить снижение опорной реакции балки относительно БДР-5 на 75 % и увеличение момента времени достижения максимального значения с  $t = 0,008$  с до  $t = 0,02$  с. Время перехода опоры в пластиче-

скую стадию  $t_{SY_{el}} = 0,0087$  с. Перемещения конструкции соответствуют перемещениям образца БДР-5. Для конструкции БДРПу-14 зафиксировано снижение опорной реакции относительно БДР-5 на 72 % и увеличение момента времени достижения максимального значения с  $t = 0,008$  с до  $t = 0,013$  с. Время перехода опоры в пластическую стадию  $t_{SY_{el}} = 0,0097$  с. Перемещения конструкции соответствуют перемещениям образца БДР-5.

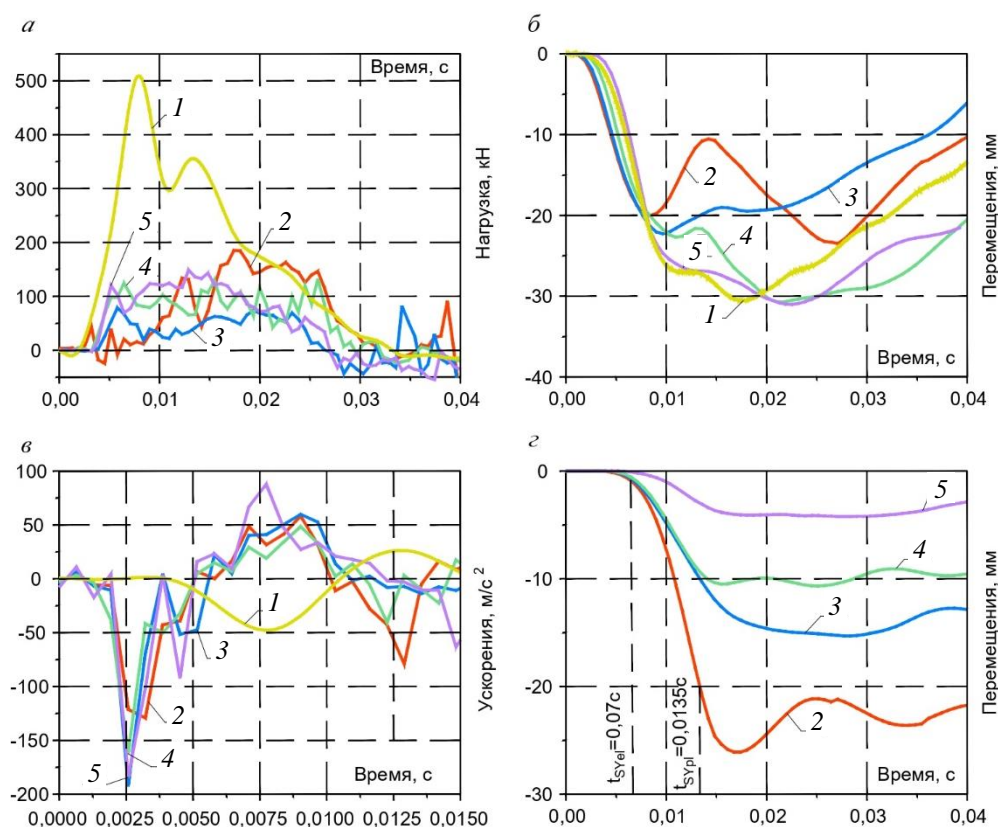


Рис. 11. Диаграммы изменения во времени опорных реакций (а), перемещений (б), ускорений (в) образцов и деформации податливых опор (г) по результатам испытаний железобетонных балок БДР-5 (1), БДРПо-11 (2), БДРПу-12 (3), БДРПу-13 (4), БДРПу-14 (5) при кратковременном динамическом нагружении

Из кадров видеосъемки конструкций БДРПу-12, БДРПу-13, БДРПу-14 (рис. 12) при работе податливых опор в упругопластической стадии видно, что с увеличением жёсткости опор происходит более сильное разрушение. При работе податливых опор в стадии отвердения для образца БДРПо-11 видно, что с уменьшением жёсткости опор происходит меньшее образование и развитие трещин относительно конструкций БДРПу-12, БДРПу-13, БДРПу-14.

Таким образом, в результате статических испытаний установлено, что наличие распора в железобетонных балках приводит к увеличению их несущей способности в 2,93 раза и снижению прогибов на 235 %.

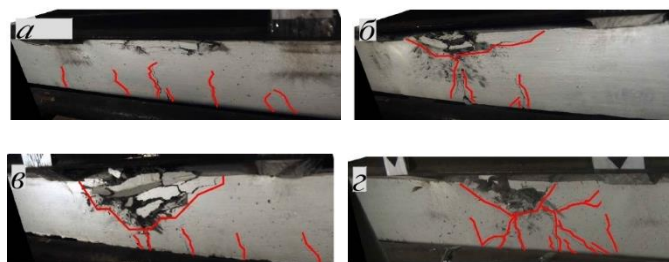


Рис. 12. Картина развития трещин в момент достижения максимальных перемещений железобетонных балок БДРПо-11 (а), БДРПу-12 (б), БДРПу-13 (в), БДРПу-14 (г) при кратковременном динамическом нагружении

При кратковременном динамическом нагружении наличие распора приводит к резкому росту опорных реакции (см. рис. 7, а и рис. 9, а) в 2,4 раза и к более раннему достижению максимального их значения. С применением податливых опор, деформирующихся в упругопластической области, происходит снижение опорных реакций до 5 раз, при этом чем выше жесткость опор, тем больше опорная реакция. Максимальное снижение опорных реакций наблюдается при работе податливых опор в стадии отвердения, причем развитие опорных реакций сглаживается, и пиковое значение наблюдается значительно позже, в момент времени  $t = 0,02$  с. Время достижения максимальных значений реакций конструкции на податливых опорах по сравнению с конструкцией на жестких опорах увеличивается в три раза. Максимальное снижение перемещений конструкции до 5 раз наблюдается при работе податливых опор в начальной стадии отвердения, в случае дальнейшего деформирования происходит резкий рост ускорения (см. рис. 9, в и рис. 11, в), существенно увеличиваются силы инерции.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абдуль-Рахман А.С. Повышение несущей способности железобетонных конструкций при взрывных воздействиях : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1995. 207 с.
2. 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.
3. Гвоздев А.А., Дмитриев С.А., Крылов С.М. Новое о прочности железобетона. Москва : Стройиздат, 1976. 272 с.
4. 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.
5. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Расчет железобетонных конструкций на действие кратковременных динамических нагрузок. Москва : Стройиздат, 1964. 151 с.
6. Тихонов И.Н. Принципы расчета прочности и конструирования армирования балок перекрытий зданий из монолитного железобетона для предотвращения прогрессирующего разрушения // Жилищное строительство. 2013. № 2. С. 40–45.
7. 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.

8. Кумпяк О.Г., Мецееулов Н.В., Люлевич Я.С. Динамическая прочность и деформативность наклонных сечений сжато-изгибаемых железобетонных конструкций на податливых опорах // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 6. С. 150–159.
9. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R. Experimental study of beams on yielding supports with thrust // MATEC Web of Conferences. 2018. V. 143. DOI: 10.1051/1.4973016
10. 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.
11. Кумпяк О.Г., Мецееулов Н.В. Численное моделирование податливых опор в виде труб кольцевого сечения при статическом и кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 5. С. 121–134.
12. Kumpyak O.G., Mesheulov N.V. Numerical simulation of yielding supports the shape of annular tubes under static and short-term dynamic loadings // International Journal for computational Civil and Structural Engineering. 2017. V. 13. № 4. P. 103–113.
13. 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.
14. 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. V. 14. P. 442–449.
15. 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.
16. 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.

## REFERENCES

1. Abdul'-Rakhman A.S. Povysheniye nesushchey sposobnosti zhelezobetonnykh konstruktсий pri vzryvnykh vozdeystviyakh: Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Bearing capacity improvement of reinforced concrete structures under explosive impacts. PhD Thesis]. Moscow, 1995. 207 p. (rus)
2. Vinogradova T.N. Vliyaniye rasporya na rabotu zhelezobetonnykh balochnykh konstruktсий pri kratkovremennykh dinamicheskikh vozdeystviyakh: Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Thrust effect on reinforced concrete beam performance under dynamic load]. Moscow, 1977. 155 p. (rus)
3. Gvozdev A.A., Dmitriyev S.A., Krylov S.M. Novoye o prochnosti zhelezobetona [New about reinforced concrete strength]. Moscow: Stroyizdat, 1976. 272 p. (rus)
4. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R. Eksperimental'nye issledovaniya opertykh po konturu zhelezobetonnykh plit s rasporyom [Experimental research of reinforced concrete edge supported slabs with spacers]. Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. 2015. No. 3. Pp. 113–120. (rus)
5. Popov N.N., Rastorguyev B.S. Raschet zhelezobetonnykh konstruktсий na deystviye kratkovremennykh dinamicheskikh nagruzok [Strength analysis reinforced concrete structures under dynamic loads]. Moscow: Stroyizdat, 1964. 151 p. (rus)
6. Tikhonov I.N. Printsipy rascheta prochnosti i konstruirovaniya armirovaniya balok perekrytiy zdaniy iz monolitnogo zhelezobetona dlya predotvrashcheniya progressiruyushchego razrusheniya [Strength analysis of beam reinforcement to prevent progressive fracture]. Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2013. No. 2. Pp. 40–45. (rus)
7. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh konstruktсий na podatlivykh oporah pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Strength and deformability of reinforced concrete structures on yielding supports under dynamic load]. Tomsk: TSUAB, 2016. 270 p. (rus)

8. Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V., Lyulevich Y.S. Dinamicheskaya prochnost' i deformativnost' naklonnykh sechenii szhato-izgibaemykh zhelezobetonnykh konstrukttsii na podatlivykh oporakh [Dynamic strength and deformability of oblique planes in compressed and bended yielding supports]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 6. Pp. 150–159. (rus)
9. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R. Experimental study of beams on yielding supports with thrust. *MATEC Web of Conferences*. 2018. V. 143. DOI: 10.1051/1.4973016
10. 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. No. 96. Pp. 88–99.
11. Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V. Chislennoye modelirovaniye podatlivykh opor v vide trub kol'tsevogo secheniya pri staticheskom i kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii [Numerical simulation of yielding supports in the form of annular tubes under static and dynamic loads]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017. No. 5. Pp. 121–134. (rus)
12. Kumpyak O.G., Mesheulov N.V. Numerical simulation of yielding supports the shape of annular tubes under static and short-term dynamic loadings. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017. V. 13. No. 4. Pp. 103–113.
13. Elfetori F.A. Experimental testing of composite tubes with different corrugation profile subjected to lateral compression load. *Engineering and Technology International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering*. 2013. V. 7. No. 2. Pp. 10–15.
14. 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. V. 14. Pp. 442–449.
15. Lion K.H., Amir R.A.G., Prasetyo E., Khairi Y. Impact energy absorption of concentric circular tubes. In: *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. 2009. V. 4. No. 3.
16. 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. No. 4. Pp. 873–882.

#### Сведения об авторах

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

Галяутдинов Дауд Рашидович, ассистент, 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, OGGKumpyak@yandex.ru

Daud R. Galyautdinov, Lecturer Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, DaudG@yandex.ru