

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.078

*КУМПЯК ОЛЕГ ГРИГОРЬЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
ogkumpryak@yandex.ru*

*МЕЩЕУЛОВ НИКИТА ВЛАДИМИРОВИЧ, аспирант,
nikita.mesheulov@mail.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДАТЛИВЫХ ОПОР В ВИДЕ ТРУБ КОЛЬЦЕВОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И КРАТКОВРЕМЕННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ*

В последнее время участились случаи экстремальных природных и техногенных воздействий на здания и сооружения в результате взрыва конденсированных взрывчатых веществ либо взрывного горения газо-, паро- или пылевоздушных смесей. Последствия таких событий влекут за собой большие человеческие и экономические потери, а методы их решения не всегда эффективны и рациональны. Целью настоящей работы является изучение способа повышения взрывобезопасности строительных конструкций вследствие податливости опор. В работе представлены результаты численных исследований прочности и деформативности податливых опор в виде труб кольцевого сечения при статическом и кратковременном динамическом нагружении. Проведена оценка степени влияния податливых опор, имеющих три характерные стадии деформирования: упругую, упругопластическую, упругопластическую с отвердением. Изложена методика численных исследований. Установлено, что жесткость податливых опор существенно влияет на их НДС. При увеличении жесткости сминаемых вставок зависимость между нагрузкой и деформированием опоры в упругой и пластической стадиях имеет линейный характер. Установлено значительное снижение динамической реакции и увеличение времени деформирования податливых опор при увеличении их пластической составляющей, что позволяет полагать возможность их применения в качестве опорных устройств для железобетонных изгибаемых и сжато-изгибаемых конструкций.

Ключевые слова: податливые опоры; прочность; деформативность; численное моделирование; статическая нагрузка; динамическая нагрузка.

* Исследования проведены при поддержке РФФИ, № 16-38-00133.

*OLEG G. KUMPYAK, DSc, Professor,
ogkumpyak@yandex.ru
NIKITA V. MESHCHEULOV, Research Assistant,
nikita.mesheulov@mail.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

NUMERICAL SIMULATION OF YIELDING SUPPORTS IN THE FORM OF ANNULAR TUBES UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADS

The extreme natural and man-made impacts on buildings have become more frequent for the past time due to the explosion of condensed explosives or explosive combustion of gas-vapor or air-coal mixtures. These accidents involve large human and economic losses and their prevention methods are not always effective and reasonable. The aim of this paper is to study the method of enhancing the explosion safety of buildings by means of yielding supports. The paper presents numerical results on strength and deformability of yielding supports in the form of annular tubes under static and dynamic loads. The effect from yielding supports is estimated taking into account three stages of deformation, namely elastic, elasto-plastic, and elasto-plastic with hardening. It is shown that the rigidity of yielding supports significantly affects their stress-strain state. With increasing rigidity of deformable elements, the dependency between load and deformation of yielding supports in elastic and plastic stages is linear. Significant reduction is observed in relation to the dynamic response and the deformation time increases with the increase of the plastic component. Thus, it is possible to apply them as supporting units for reinforced concrete bending structures.

Keywords: yielding supports; strength; deformability; numerical simulation; static load; dynamic load.

Введение

Взрывные воздействия относятся к однократным аварийным нагрузкам. Они характеризуются высокой интенсивностью и малым временем действия, что приводит не только к разрушению конструкций и повреждению технологического оборудования, но и к гибели людей. Существующие подходы к проектированию строительных систем, устойчивых к взрывным воздействиям, основаны на увеличении материалоемкости конструкций, что приводит к повышению стоимости объектов. Таким образом, возникает потребность в создании альтернативных экономически целесообразных и надежных подходов к проектированию конструкций, устойчивых к восприятию динамических нагрузок.

Податливые опоры являются одним из активных способов защиты конструкций, основанных на предотвращении или локализации динамического воздействия либо снижении интенсивности динамической нагрузки.

В настоящее время результаты исследований в области применения податливых опор для защиты конструкций, подверженных динамическим нагрузкам большой интенсивности, носят фрагментарный характер. Представленные экспериментальные, теоретические и экспериментально-теоретические исследования [1–10] свидетельствуют не только о положительном, но и об отрицательном влиянии податливости опорных закреплений на динамическую реакцию железобетонных изгибаемых конструкций. Предметом исследования настоящей работы является численное изучение прочности и деформативности

податливых опор в виде труб кольцевого сечения при статическом и кратковременном динамическом нагружении.

Методика проведения численных исследований податливых опор при статическом нагружении

Для решения поставленных задач в качестве расчетного комплекса принят программный комплекс Ansys Mechanical, v 17.2. На первом этапе работы был произведен расчет податливых опор при действии квазистатической нагрузки с постоянной скоростью нагружения.

Расчетная модель является идеализированной и формализованной копией физической и с большой точностью повторяет методику экспериментальных исследований [1] (рис. 1). Конечно-элементная модель состоит из двух плит, одна из которых является опорной и неподвижной, вторая плита служит силовой и имеет возможность вертикального перемещения. Третьим элементом модели выступает податливая опора. Шаг дискретизации сетки конечных элементов (КЭ) плит составляет 4 мм, податливой опоры – $(0,8 \pm 0,1)$ мм. В качестве КЭ используется восьмиузловой конечный элемент SOLID185. КЭ определяется тремя поступательными степенями свободы, включает в себя возможность использования пластичных материалов и способен воспринимать большие деформации. В модели используются КЭ низкого порядка (h -метод моделирования). Расчет производился для всех рассматриваемых длин податливых опор в диапазоне от 10 до 120 мм (рис. 2). Размерность решаемой задачи, в зависимости от длины податливой опоры, варьировалась от 5664 до 58 464 конечных элементов. Работа материала податливой опоры описывалась мультилинейной диаграммой деформирования материала с изотропным упрочнением, полученной путем предварительного натурального экспериментального исследования материала на растяжение.

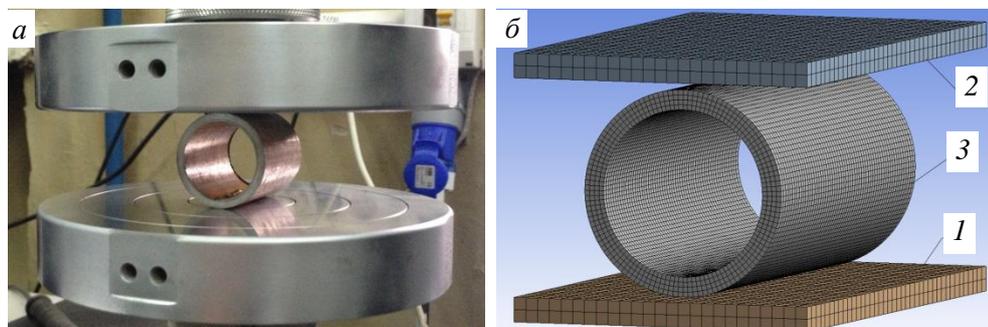


Рис. 1. Общий вид испытания податливых опор:
a – натуральный эксперимент; *б* – численное моделирование; 1 – опорная плита; 2 – силовая плита; 3 – податливая опора

Нагружение податливой опоры производилось путем заданного перемещения верхней плиты (рис. 1) на расстояние, соответствующее внутреннему диаметру податливой опоры.

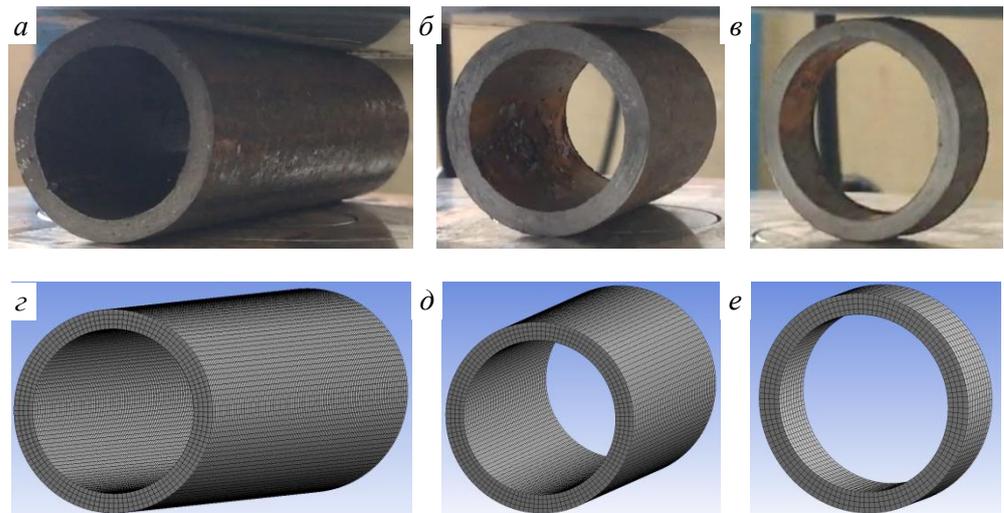


Рис. 2. Общий вид податливых опор разной длины:

a, б, в – экспериментальные исследования; *г, д, е* – численная КЭ модель; *a, г* – 120 мм; *б, д* – 60 мм; *в, е* – 10 мм

Результаты численных исследований податливых опор при статическом нагружении

Рассмотрим характерные особенности деформирования податливых опор на примере вставки кольцевого сечения длиной 40 мм (рис. 3). Как видно, для всех стадий работы податливой опоры картина деформирования при натурном эксперименте соответствует характеру деформирования при численном моделировании. Так как геометрия исследуемого образца в процессе нагружения неоднократно существенно изменяет свою форму и, соответственно, жёсткость, для этого к модели была подключена опция учета конечных перемещений и углов поворотов после каждой равновесной итерации. В процессе деформирования податливая опора взаимодействует с силовыми плитами, неоднократно меняя свою расчетную схему. После возникновения пластических деформаций в податливой опоре точка соприкосновения с каждой из силовых плит делится на две и по мере увеличения нагрузки распространяется от центра опоры к ее краям (рис. 4). Для учета этого процесса в модели были созданы контактные пары между вставкой и силовыми плитами, а также между внутренней поверхностью податливой опоры.

Синим цветом на рис. 4 указаны контактные элементы, существенно удаленные от контактирующей поверхности. Желтым цветом указаны контактные элементы, находящиеся в непосредственной близости от контактирующей поверхности. Красным цветом отображаются контактные элементы, взаимодействующие с контактирующей поверхностью, в частности с силовой плитой. Вместе с тем при деформировании податливых опор происходит контакт внутренних поверхностей кольца (рис. 3, *в, ж*), что в свою очередь еще раз подвергает расчётную модель изменению. После этого внутренние поверхности соприкасаются полностью (рис. 3, *з, з*).

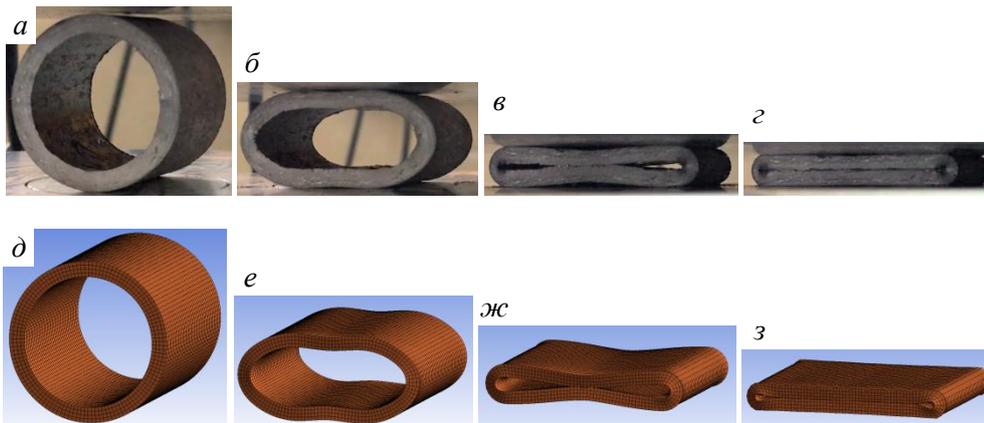


Рис. 3. Характерные стадии деформирования податливых опор:
a, d – упругая; *б, e* – упруго-пластическая; *в, ж, з, з* – упруго-пластическая с отвердением

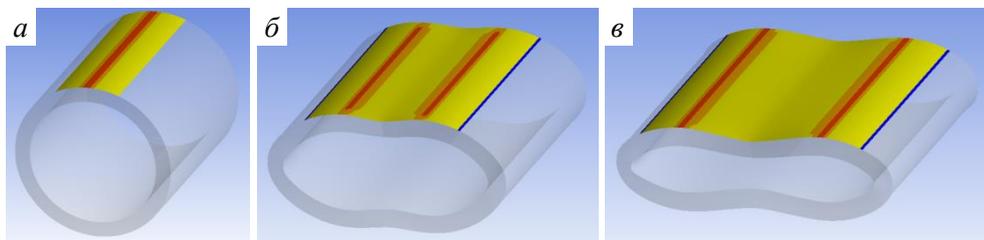


Рис. 4. Изменение расчетной схемы податливой опоры в процессе деформирования:
a – одна точка соприкосновения с плитой; *б, в* – две точки соприкосновения с плитой

Характерно, что в процессе деформирования происходит искривление торцов податливых опор в зонах образования шарниров пластичности, в результате чего соприкосновение внутренней поверхности кольца происходит не одновременно, а от торцов к середине (рис. 5).

В качестве контактного интерфейса взаимодействия для всех контактных пар задачи применяется модель контакта с трением $\mu = 0,15$. Используемая модель включает в себя возможность разделения контактных пар после взаимодействия и в общем случае может содержать участки сцепления и скольжения. В качестве метода решения контактного взаимодействия использовался расширенный метод Лагранжа, основанный на зависимости контактной силы от величины проникновения:

$$F_n = k_n x_p + \lambda, \tag{1}$$

где k_n – контактная жёсткость в направлении нормали к поверхности; x_p – величина проникновения по нормали к поверхности; λ – слагаемое, снижающее чувствительность к величине контакта. В качестве метода решения использовался шагово-итерационный метод решения СЛАУ:

$$[K]\{u\} = \{F\}, \tag{2}$$

где $[K]$ – матрица жесткости; $\{u\}$ – вектор перемещений; $\{F\}$ – вектор внешних сил.

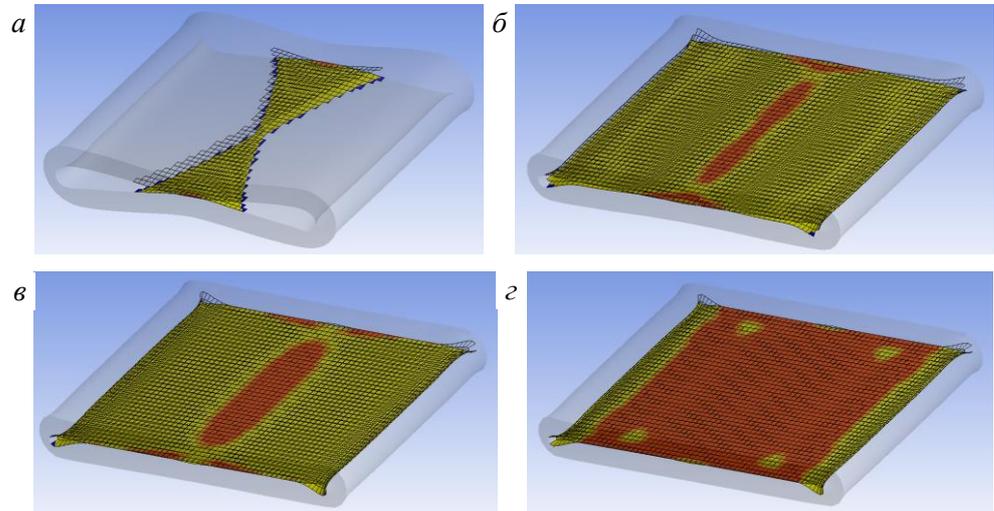


Рис. 5. Изменение расчетной схемы податливой опоры в процессе деформирования:
a – соприкосновение контактных пар у торцов; *б* – контакт внутренних поверхностей в средней части; *в* – постепенное увеличение пятна контакта в средней зоне; *г* – полное соприкосновение внутренних поверхностей

Контроль решения нелинейной задачи осуществлялся методом Ньютона – Рафсона, основанным на уравнении равновесия

$$R = \|F_{\text{ext}} - F_{\text{int}}\|_2 = \sqrt{\sum_{i=0}^N (F_{\text{ext},i} - F_{\text{int},i})^2}, \quad (3)$$

где R – разница между внешними и внутренними векторами сил; F_{ext} – внешний вектор силы; F_{int} – внутренний вектор силы; N – количество элементов вектора, равное количеству узлов в конечно-элементной модели.

При решении задачи статического нагружения податливых опор допускалась невязка между внешними и внутренними силами в размере 5 %.

По мере увеличения количества элементов в решаемой задаче для обеспечения высокой точности требовалось пропорциональное увеличение количества равновесных итераций. Таким образом, задачи предусматривали от 500 до 8000 итераций. Анализ результатов численного исследования показал, что значительное деформирование податливых опор происходит с возникновением шарниров пластичности при достижении напряжений в материале, соответствующих пределу текучести.

Дальнейшее деформирование сопровождается плавным ростом пластических деформаций и увеличением зоны активного деформирования. Стоит отметить значение относительных деформаций на внутренней боковой поверхности податливой опоры $\varepsilon > 39\%$ (рис. 6, г), что превышает предельные деформации стали С255 $\varepsilon_{\text{ст}255} > 26\%$. Указанная область деформирования испытывает сжимающие усилия, и вследствие криволинейной геометрии образца в данных локализациях проявляется эффект самоупрочнения материала.

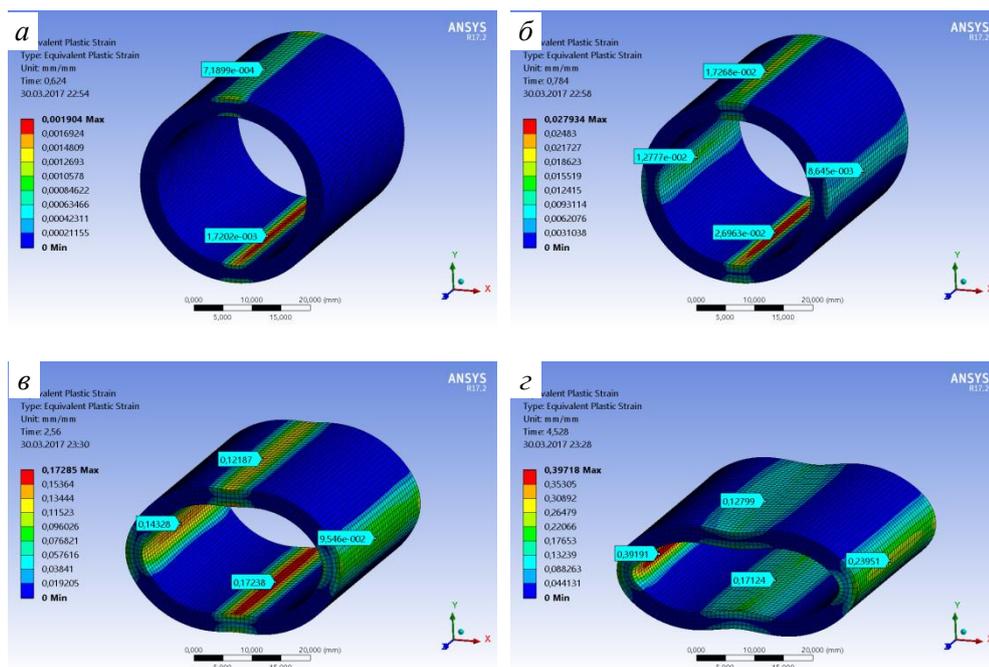


Рис. 6. Картина распределения пластических деформаций в податливой опоре

Анализ результатов численных и экспериментальных исследований при действии квазистатической нагрузки можно произвести на основе диаграммы деформирования податливых опор (рис. 7). Здесь представлены диаграммы «нагрузка – перемещение» для податливых опор длиной 10 и 20–120 мм с шагом 20 мм. Анализируя диаграммы, можно судить о высоком уровне сходимости результатов экспериментальных и численных исследований на всех стадиях работы податливых опор.

Стоит отметить, что при увеличении жесткости податливых опор, при проведении экспериментальных исследований, на диаграммах деформирования отмечается «зуб текучести» при переходе работы опоры из упругой в пластическую стадию деформирования, однако на диаграммах численных исследований подобное явление не установлено. Данный эффект справедлив для малоуглеродистой стали. Явление «зуба текучести» связано с дислокационным механизмом деформации. На начальном участке плотность дислокаций является недостаточной для обеспечения более высокой степени деформации. После достижения верхнего предела текучести начинается интенсивное образование новых дислокаций, что приводит к падению напряжения. В ПК Ansys v. 17.2 дислокационные механизмы деформации, относящиеся к микроструктурному строению стали, не учитываются, что и приводит к отсутствию «зуба текучести» (рис. 7). Вместе с тем локальная погрешность абсолютного значения нагрузки между экспериментальным и численным результатом составляет не более 3,5 % и в условиях решения данной задачи не вносит существенного изменения в общую картину деформирования податливой опоры.

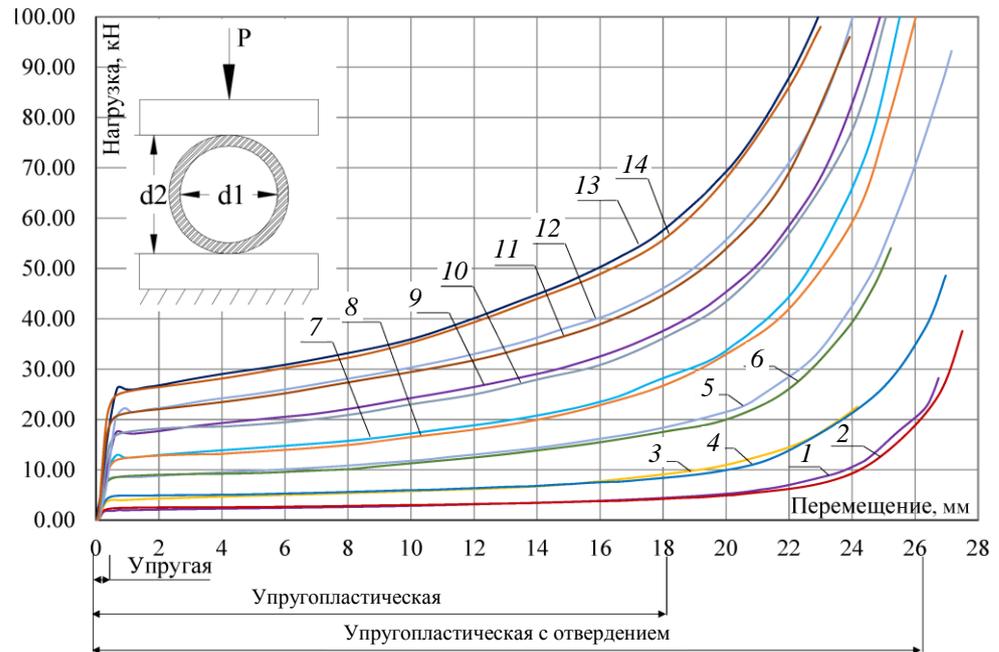


Рис. 7. Диаграмма деформирования податливых опор разной длины при численном и экспериментальном исследовании:

d_1 – внутренний диаметр; d_2 – внешний диаметр податливой опоры; нечетные цифры соответствуют экспериментальным исследованиям; четные – численное моделирование; 1, 2 – 10 мм; 3, 4 – 20 мм; 5, 6 – 40 мм; 7, 8 – 60 мм; 9, 10 – 80 мм; 11, 12 – 100 мм; 13, 14 – 120 мм

Методика проведения численных исследований податливых опор при динамическом нагружении

Моделирование процесса динамического воздействия производилось в модуле ПК Ansys v. 17.2-explicit dynamic. В нем для решения поставленной задачи использовалась явная схема интегрирования по времени с автоматическим определением размера временного шага исходя из условия Куранта – Фридрихса – Леви:

$$\Delta t \leq f \left[\frac{h}{c} \right]_{\min}, \quad (4)$$

где Δt – шаг по времени; f – число Куранта ($f < 1$); h – характерный размер элемента; c – локальная скорость распространения звука в материале элемента. Решение представленных задач производилось с использованием подхода Лагранжа к описанию движения среды.

Целью моделирования работы податливых опор при воздействии кратковременной динамической нагрузки являлась оценка степени влияния жесткости податливой опоры на динамическую реакцию системы: груз – податливая опора – опорная пластина (рис. 8). В работе в качестве изменяющегося

параметра жесткости выступало изменение длины сминаемой вставки. Поперечное сечение и материал податливой опоры приняты в соответствии с экспериментальными исследованиями [1].

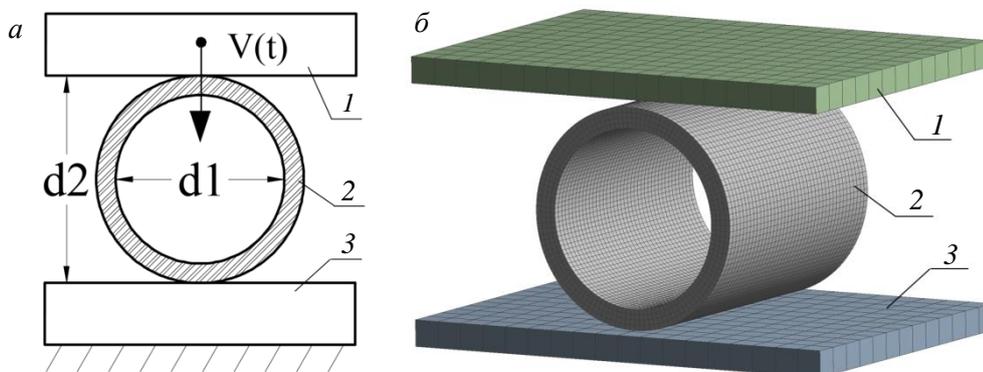


Рис. 8. Расчетная схема испытания податливой опоры при кратковременном динамическом воздействии (а); общий вид КЭ модели (б):
 1 – груз; 2 – податливая опора; 3 – опорная пластина; d1 – внутренний диаметр; d2 – внешний диаметр

В рамках решаемой задачи моделировался момент столкновения груза 1 с податливой опорой 2. Причем масса груза 1 соответствовала массе, используемой при экспериментальных исследованиях, и составляла 265 кг. Для этого плотность груза 1 была увеличена для каждой из решаемых задач. Скорость груза 1 в момент удара с податливой опорой 2 соответствовала скорости груза, сброшенного с высоты 650 мм при экспериментальных исследованиях. Скорость груза 1 при столкновении с податливой опорой 2 вычислялась по зависимости, полученной из формул для равноускоренного прямолинейного движения, и составляла 3,57 м/с²:

$$S_x = \frac{v_x^2 - v_0^2}{2ax}, \quad (5)$$

где S_x – высота падения груза (составляет 0,65 м); v_x^2 – квадрат скорости в момент удара груза 1 и податливой опоры 2; v_0^2 – квадрат начальной скорости падения груза 1 (0 м/с² – груз подвешен); a_x – ускорение груза 1 (соответствует ускорению свободного падения 9,81 м/с²).

Опорная пластина 3 имела жесткое закрепление по всем степеням свободы. Груз 1 и опорная пластина 3, ввиду своей небольшой толщины в модели (рис. 8, б), были приняты как абсолютно жесткие элементы.

В работе рассмотрены три характерных типа опор (рис. 9): а – абсолютно упругая или жесткая опора; б – податливая опора, работающая в упругопластической с отверждением стадии; в – податливая опора, работающая в упругопластической стадии.

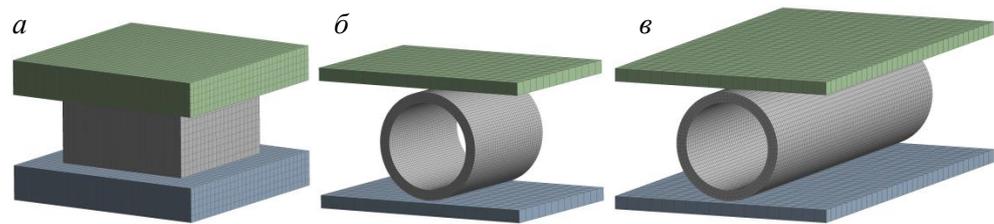


Рис. 9. Расчетные модели опор при кратковременном динамическом воздействии: *a* – абсолютно упругая (жесткая) опора; *б* – податливая опора, работающая в упругопластической с отвердением стадии; *в, г* – податливые опоры, работающие в упругопластической стадии

Результаты численных исследований податливых опор при динамическом нагружении

Степень влияния жесткости опоры можно оценить на диаграмме (рис. 13). В первом случае (рис. 9, *a*) представлена опора, имеющая характеристики низкоуглеродистой стали, деформирование которой подчиняется закону Гука, т. е. ее работа не предполагает возникновения пластических деформаций. Данную опору условно можно считать жесткой, т. к. относительные деформации в ней при динамическом воздействии будут изменяться по линейному закону с постоянным модулем деформации, соответствующим модулю упругости стали. Для опоры, работающей в упругопластической с отвердением стадии (рис. 9, *б*), характерно пластичное деформирование с плавным увеличением динамической реакции до момента, когда внутренние поверхности опор соприкоснутся (рис. 10 и 13, *б*, точка *A*). После этого происходит резкое увеличение значения динамической реакции.

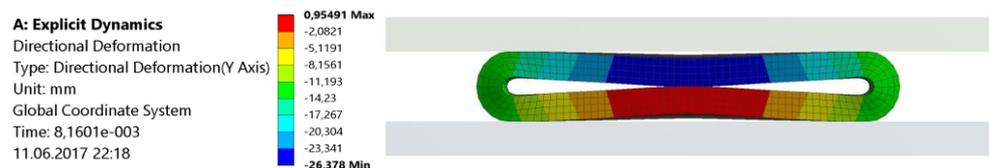


Рис. 10. Общая схема деформирования опоры, работающей в упругопластической с отвердением стадии, момент перехода опоры в стадию отвердения – точка *A* (рис. 13, *б*)

Опоры, работающие в упругопластической стадии (рис. 9, *в* и 13, 3, 4), в зависимости от своей жесткости могут иметь отличную друг от друга диаграмму динамической реакции. По мере увеличения пластической составляющей таких опор происходит увеличение времени реакции. Так, для опоры длиной 120 мм (рис. 13, 4) по отношению к опоре длиной 1600 мм (рис. 13, 3) произошло увеличение времени динамического сопротивления в 2,66 раза, что говорит о более пластичной работе первой. Вместе с тем опора большей длины не исчерпывает весь потенциал пластических свойств (рис. 11), в то

время как опора меньшей длины практически соприкасается внутренними поверхностями кольца (рис. 12).

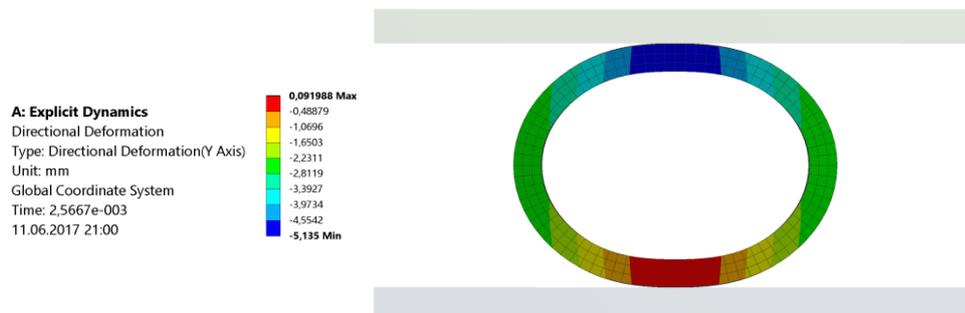


Рис. 11. Общая схема деформирования опоры, работающей в упругопластической стадии (длина опоры 1600 мм)



Рис. 12. Общая схема деформирования опоры, работающей в упругопластической стадии (длина опоры 120 мм)

Стоит отметить снижение максимального значения динамической реакции (рис. 13, 3, 4) с 407 кН, соответствующее опоре длиной 1600 мм, до 288 кН для опоры длиной 120 мм, что составляет 29,2 %. При сопоставлении работы опоры в упругопластической стадии (рис. 13, 3, 4) с опорами, работающими в стадии отвердения (рис. 13, 2), установлено снижение динамической реакции системы (рис. 13) в 6,4 раза. При анализе работы податливых опор (рис. 13, 2–4) с абсолютно упругой (жесткой) опорой (рис. 13, 1) наблюдается существенное снижение динамической реакции системы. Так, для упругопластической опоры (рис. 13, 4), относительно жесткой (рис. 13, 1), снижение составило 23,4 раза, а для упругопластической с отвердением – 6,62 раза. Вместе с тем стоит отметить увеличение времени динамической реакции для податливых опор относительно жестких (рис. 13). Для жестких опор время деформирования составляет 0,0005 с, для опор, работающих в стадии отвердения, – 0,009 с, а для упругопластических – 0,012 с, что соответственно в 18 и в 24 раза больше, чем для жестких опор. При сопоставлении работы опоры в упругопластической стадии (рис. 13, 3, 4) с опорами, работающими в стадии отвердения (рис. 13, 2), установлено снижение динамической реакции системы (рис. 13) в 6,4 раза.

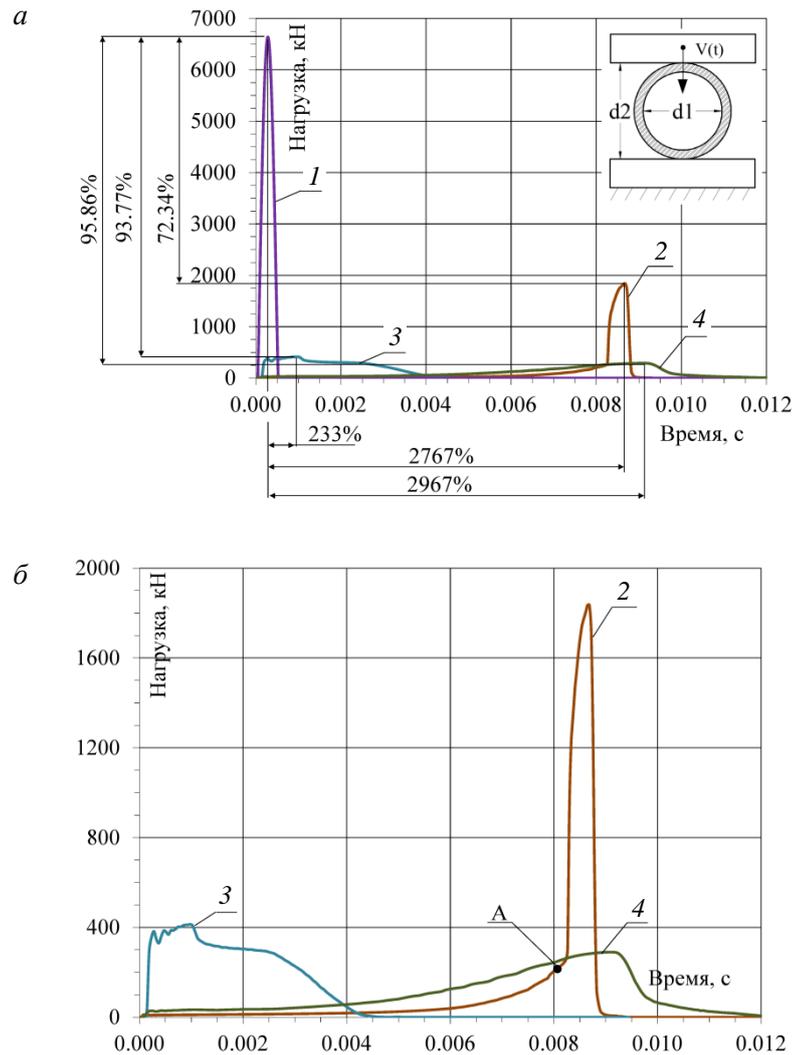


Рис. 13. Диаграмма изменения динамической реакции опор в зависимости от их жесткости:

a – сравнение динамической реакции податливых опор по отношению к жесткой; *б* – сравнение динамической реакции податливых опор, работающих в различных стадиях; 1 – абсолютно упругая (жесткая) опора; 2 – податливая опора, работающая в упругопластической с отвердением стадии; А – момент перехода податливой опоры в стадию отвердения; 3, 4 – податливые опоры, работающие в упругопластической стадии

Выводы

Совокупность фактов, изложенных в настоящей работе, позволяет говорить о высокой степени эффективности податливых опор в виде вставок кольцевого сечения при воздействии на них кратковременной динамической нагрузки по сравнению с традиционными абсолютно упругими (жесткими) опорами. Эффект от использования податливых опор достигается за счет осо-

бенности пластического деформирования кольцевого сечения и увеличения времени динамического деформирования. Таким образом, полученные результаты позволяют судить о возможности использования податливых опор для увеличения динамической прочности изгибаемых и сжато-изгибаемых железобетонных конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кумпяк, О.Г. Прочность сжато-изгибаемых железобетонных конструкций по наклонным сечениям на податливых опорах при динамическом нагружении / О.Г. Кумпяк, Н.В. Мещулов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 6. – С. 70–80.
2. Poonaya, S. An Analysis of Collapse Mechanism of Thin-Walled Circular Tubes Subjected to Bending / S. Poonaya, C. Thinvongpituk, U. Teeboonma // Proceedings of WASET. – 2007. – № 26. – P. 329–334.
3. Constitutive and geometric nonlinear models for the seismic analysis of rc structures with energy dissipators / P. Mata, A. Barbat, S. Oller, R. Boroschek // Arch. comput. methods eng. – 2008. – № 15. – P. 489–539.
4. Olabi, A. Metallic tube type energy absorbers: A synopsis/ A. Olabi, E. Morris, M. Hashmi // Journal of Thin-Walled Structures. – 2008. – № 45. – P. 706–726.
5. Marzbanrad, J. An energy absorption comparison of square, circular, and elliptic steel and aluminum tubes under impact loading / J. Marzbanrad, M. Mehdikhanlo, A. Saeedi Pour // Turkish J. Eng. Env. Sci. – 2009. – № 33. – P. 159–166.
6. Kumpyak, O.G. Strength of concrete structures under dynamic loading/ O.G. Kumpyak, Z.R. Galyautdinov, D.N. Kokorin // Advanced Materials in Technology and Construction : II All-Russian Scientific Conference of Young Scientists. – 2015. – № 1698.
7. Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading / B. Chiaia, O.G. Kumpyak, L. Placidi, V.B. Maksimov // Engineering Structures. – 2015. – № 96. – P. 88–99.
8. Расторгуев, В.С. Применение динамических гасителей колебаний при взрывных воздействиях / В.С. Расторгуев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2009. – № 1. – С. 50–57.
9. Кумпяк, О.Г. Прочность и деформативность железобетонных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении / О.Г. Кумпяк, З.Р. Галаяутдинов, Д.Н. Кокорин. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2016. – 272 с.
10. Kumpyak, O.G. Deformability of oblique section of RC beams on yielding supports under dynamic impact/ O.G. Kumpyak, N.V. Meshcheulov / Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects : IV International Young Researchers Conference. – 2017. – № 1800.

REFERENCES

1. Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V. Prochnost' szhato-izgibaemykh zhelezobetonnykh konstruktssii po naklonnym secheniyam na podatlivykh oporakh pri dinamicheskom nagruzhenii [Oblique-section compressive and flexural strength of yield-supported concrete structures under dynamic load]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 6. Pp. 70–80. (rus)
2. Poonaya S., Thinvongpituk C., Teeboonma U. An Analysis of collapse mechanism of thin-walled circular tubes subjected to bending. *Proceedings of WASET*. 2007. No. 26. Pp. 329–334.
3. Mata P., Barbat A., Oller S., Boroschek R. Constitutive and geometric nonlinear models for the seismic analysis of RC structures with energy dissipators. *Arch. Comput. Methods Eng*. 2008. No. 15. Pp. 489–539.
4. Olabi A., Morris E., Hashmi M. Metallic tube type energy absorbers: A synopsis. *Journal of Thin-Walled Structures*. 2008. No. 45. Pp. 706–726.

5. Marzbanrad J., Mehdikhanlo M., Saeedi Pour A. An energy absorption comparison of square, circular, and elliptic steel and aluminum tubes under impact loading. *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 2009. No. 33. Pp. 159–166.
6. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Strength of concrete structures under dynamic loading. *Proc. 2nd All-Rus. Sci. Conf. of Young Scientists 'Advanced Materials in Technology and Construction'*. 2015. No. 1698.
7. Chiaia B., Kumpyak O.G., Placidi L., Maksimov V.B. 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.
8. Rastorguev V.S. Primenenie dinamicheskikh gasitelei kolebanii pri vzryvnykh vozdeistviyakh [Application of dynamic vibration dampers under explosive loads]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2009. No. 1. Pp. 50–57. (rus)
9. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnnykh konstruksii na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhenii [Strength and deformability of reinforced concrete structures on yielding supports under dynamic load]. Tomsk: TSUAB Publ., 2016. Pp. 149–246. (rus)
10. Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V. Deformability of oblique section of RC beams on yielding supports under dynamic impact. *Proc. 4th Int. Sci. Conf. 'Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects'*. 2017. No. 1800.