

А.В. АЛЕКСЕЙЦЕВ¹, Н.С. КУРЧЕНКО¹, С.А. САЗОНОВА¹

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия

ДИНАМИКА ФИБРОЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ НА ПОДАТЛИВЫХ ОПОРАХ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ПО ПЛОЩАДИ ИМПУЛЬСНОЙ НАГРУЗКЕ

Аннотация. Статья посвящается численному анализу напряженно-деформированного состояния фиброжелезобетонных плитных конструкций при аварийных динамических воздействиях. Рассматривается сборная плита покрытия защитного сооружения, заглубленного в грунт. Ударные воздействия на плиту считаются импульсными. Причиной их возникновения полагается взрыв на поверхности земли или иной импульс, передающийся через грунт на конструкцию. Исследуется изменение во времени компонентов НДС в бетоне и арматуре при изменении податливости опор. Рассматривается возможность жесткого или упругопластического деформирования опор при ударном воздействии. На конкретном примере показана эффективность предлагаемого подхода при симметричном нагружении импульсной нагрузкой с учетом переменной площади пятна удара. Численное моделирование показало, что как при статическом, так и при динамическом догружении плита разрушается по фибробетону с образованием вантового механизма, при этом сохраняя свойство живучести при обеспечении неразрушаемости арматуры. Показано, что использование податливых опор играет существенную роль в демпфировании колебаний и позволяет регулировать как уровень механической безопасности конструкции, так и ее материалоемкость. Установлена необходимость и актуальность определения фактических демпфирующих свойств конструкций рассматриваемого типа.

Ключевые слова: живучесть, импульсное воздействие, динамический анализ, демпфирование, численное моделирование, железобетонные конструкции, защитные сооружения.

A.V. ALEKSEYTSEV¹, N.S. KURCHENKO¹, S.A. SAZONOVA¹

¹Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

FIBRO REINFORCED CONCRETE PLATE DYNAMICS ON DEFORMABLE SUPPORTS WITH VARIABLE AREA OF BLAST LOAD

Abstract. The article is devoted to the numerical analysis of the stress-strain state of fiber reinforced concrete slab structures under emergency dynamic impacts. A prefabricated cover slab of a protective structure buried in the ground is considered. Shock effects on the slab are considered to be blast ones. An explosion at the ground surface or another impulse transmitted through the ground to the structure is assumed to be the cause of their occurrence. The change in time of the components of the stress-strain in concrete and reinforcement is investigated in case of change in the suppleness of the supports. The possibility of rigid or elastoplastic deformation of supports under impact action is considered.

By means of a concrete example, the efficiency of the suggested approach is demonstrated under symmetric loading by a blast load taking into account a variable shock spot area. Numerical modeling has shown that under both static and dynamic additional loading the slab fractures along the fibro concrete with the formation of a cable mechanism while preserving the survivability property of the reinforcement.

It is shown that the use of compliant supports plays an essential role in damping of vibrations and allows to regulate both the level of mechanical safety of the structure and its material capacity. The necessity and urgency of determining the actual damping properties of the structures of the considered type has been established.

Keywords: *survivability, impulse action, dynamic analysis, damping, numerical modeling, fibro reinforced concrete structures, protective structures.*

Введение

Расчёт и проектирование несущих конструкций защитных сооружений является актуальной инженерной и исследовательской задачей. При этом к используемым железобетонным, стальным и другим конструкциям предъявляется основное требование – обеспечение механической безопасности. В научных исследованиях представляет интерес рассмотрение различных динамических аварийных воздействий [1-4], в том числе ударных импульсных воздействиях различной формы [5-8]. В ряде случаев обеспечение тех или других эксплуатационных качеств конструкции при таких воздействиях сопряжено со значительным дополнительным расходом материала. Для решения этой задачи могут быть использованы опоры, демпфирующие колебания от динамических воздействий, что может существенно уменьшать динамические догрузки в конструкциях [9-12]. Перспективными также представляются подходы, реализующие подбор рациональных параметров для таких объектов на основе процедур мета-эвристического поиска [13-15]. При этом динамическая нагрузка должна представляться в виде некоторого статического эквивалента, что может быть осуществимо на основе энергетического подхода [16, 17]. Однако следует учитывать, что этот подход может применяться при качественном совпадении собственной формы колебаний конструкции, возбуждаемой нагрузкой, с деформированной схемой от действия этой нагрузки. Таким образом, одной из основных задач при проектировании несущих железобетонных конструкций защитных сооружений является оценка напряжённо-деформированного состояния в условиях динамических воздействий, в том числе и определение предельной нагруженности.

Известны работы [10-12], в которых подходы к динамическому расчёту конструкций на податливых опорах представляются достаточно сложными аналитическими моделями. Их применение в инженерной практике сдерживается высокой трудоемкостью и адаптацией к определенному типу конструкций и опорных закреплений. В связи с этим представляется актуальной разработка численных моделей для воспроизведения напряженного-деформированного состояния таких конструкций при различных формах импульса и времени действия нагрузок.

В данной работе представлен подход к численному моделированию железобетонных конструкций плит покрытия защитных сооружений при наличии жестких и податливых опор. Выполнена оценка влияния демпфирующих эффектов на величины напряжений, деформаций и перемещений этих конструкций. Даны предложения по методике поиска рациональных параметров жёсткостей опор для динамических воздействий заданного типа и интенсивности с целью получения наименее материалоемких конструкций.

Методы.

В качестве причины динамической импульсной нагрузки рассматриваем взрывное детонационное воздействие на поверхности грунта. Точное моделирование импульсной ударной нагрузки, действующей на заглубленную в грунт конструкцию представляется сложной и малоизученной задачей, однако, положения работ отдельных исследований, например [17-19], позволяют выполнять приближенную оценку интенсивности динамической нагрузки в виде импульса, передаваемого через грунт на конструкцию и ее силового эквивалента q_{eq} . Для импульсной нагрузки при детонационном взрыве (рисунки 1 а) влияние фазы разрежения на конструкцию при нахождении эпицентра взрыва на поверхности земли незначительно, поэтому учитываем только фазу сжатия.

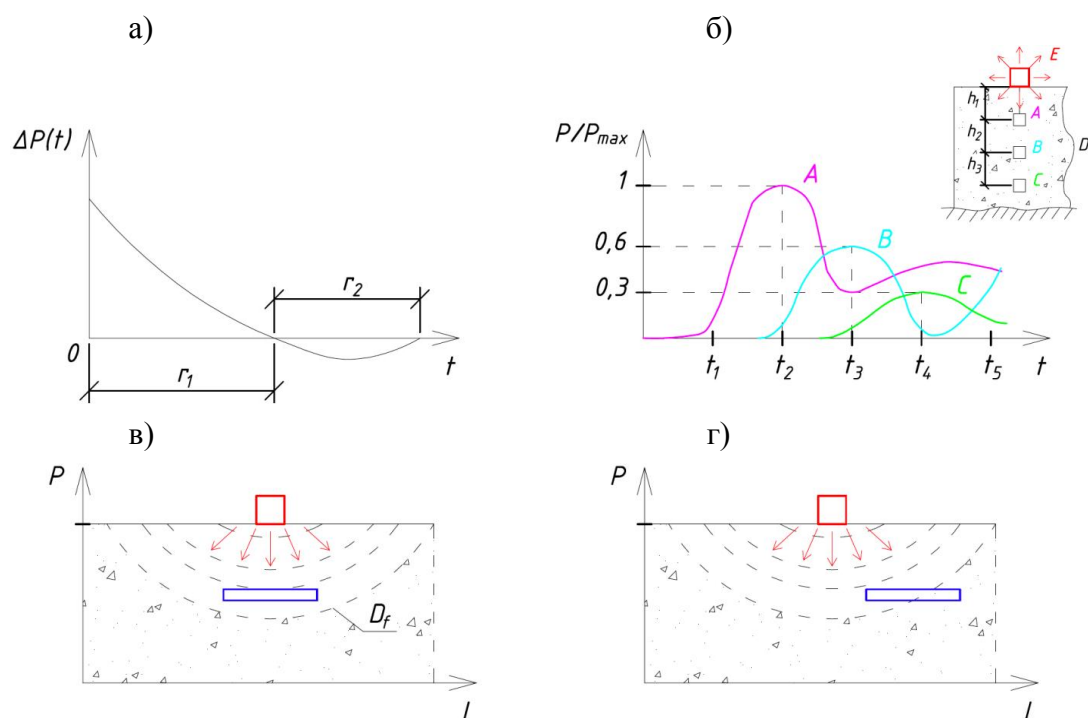


Рисунок 1 – К моделированию нагрузки на конструкцию: а) изменение импульса Δp во времени t при детонационном взрыве: τ_1, τ_2 – время разряжения и время сжатия с образованием волн в грунте; б) изменение интенсивности импульса в грунте по глубине: А, В, С – точки по глубине, D – грунтовое основание, E – заряд взрывчатого вещества; в-г) расположение конструкции относительно эпицентра взрыва: Df – распространение фронта волны в грунте

Принимаем плотный связный грунт, график изменения интенсивности импульса во времени по глубине грунта имеет вид, показанный на рисунке 1 б. Характер распространения фронта взрывной волны в грунте принят на основе данных численного анализа работы [18]. Для рассматриваемой нами конструкции будем рассматривать два возможных варианта передачи на конструкцию импульсной нагрузки (рисунок 1 б).

Для перехода от импульса i к эквивалентному силовому воздействию q_{ed} используем условие равенства импульса, передаваемого в результате взрыва грунтом, воспринимаемому конструкцией, импульсу силы q_{ed} :

$$i = \mu P \tau_1 / 2 = q_{ed} t, \quad (1)$$

где μ – коэффициент, учитывающий заглубление конструкции (см. рисунок 1 б), t – время действия на конструкцию динамической нагрузки. Интенсивность импульса P в формуле (1) можно определить на основе модели JWL (Джонса-Вилкинса-Ли) по уравнению:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}, \quad (2)$$

где величины, входящие в уравнение (2) подробно описаны в работе [19]. Решение задачи в рамках метода конечных элементов реализуется на основе разрешающей системы уравнений метода конечных элементов

$$[M] \ddot{z}(t) + [C] \dot{z}(t) + [K_\tau(t)] z(t) = F(t) + G \chi(t), \quad (3)$$

где $[M], [C]$ – матрицы масс и демпфирования для конечно-элементной модели конструкции, $[K_\tau(t)]$ – касательная матрица жесткости, сформированная для деформированного состояния системы; $\ddot{z}(t), \dot{z}(t), z(t)$ – соответственно векторы ускорений, скоростей и перемещений, $F(t)$ – вектор узловых сил, $\chi(t)$ – функция Хевисайда, G – вектор приведенных к узлам сил тяжести, t – время интегрирования, представленное совокупностью дискретных значений с определенным шагом.

Матрица $[K_\tau(t)]$ в формуле (3) для рассматриваемой нами задачи определяется по формуле (4):

$$[K_\tau(t)] = [K_{bo}(t)] + [K_{so}(t)] + [K_{po}(t)] + [K_{b\sigma}(t)] + [K_{s\sigma}(t)] + [K_{p\sigma}(t)], \quad (4)$$

где $[K_{bo}(t)], [K_{so}(t)], [K_{po}(t)]$ – матрицы малых деформаций для объемных гексаэдрических конечных элементов фибробетона, стержневых элементов арматуры и стальных оболочек, описывающих деформации опор соответственно; $[K_{b\sigma}(t)], [K_{s\sigma}(t)], [K_{p\sigma}(t)]$ – геометрические матрицы для, соответственно, элементов фибробетона, арматуры и опор.

В рамках метода конечных элементов представление импульсной нагрузки, изменяющейся во времени и имеющей изменяющуюся площадь удара, реализовано на основе равенства

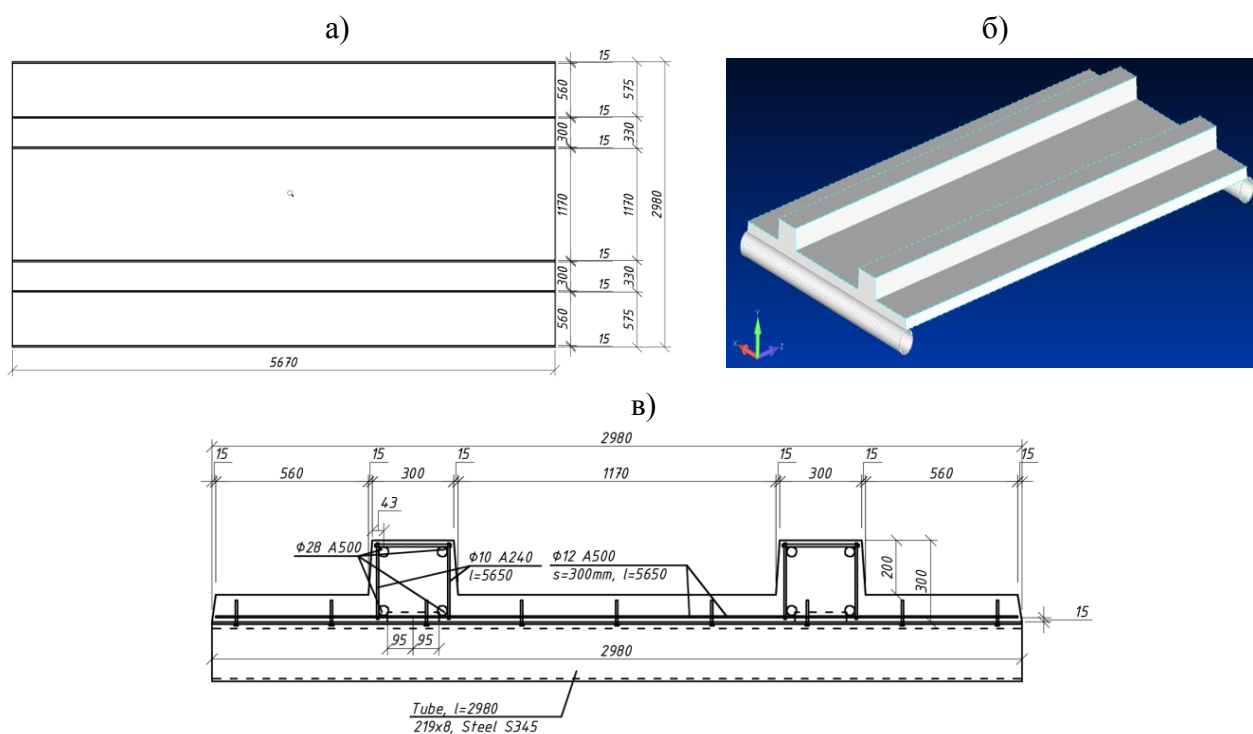
$$F(t) = q_{st} Q_{st}(t) + \sum_{i=1}^S q_{i,eq} Q_i(t), \quad (5)$$

где $q_{st}, q_{i,eq}$ – константы, значения нагрузок действующих в период эксплуатации и аварийного динамического догружения соответственно, S – число участков (площадей), на которых действует нагрузка, $Q_{st}(t), Q_i(t)$ – функции изменения нагрузок во времени, нормированные по значению соответствующих нагрузок.

Для решения системы уравнений (3) использована неявная схема численного интегрирования. Моделирование деформаций фибробетона выполнялось на основе теоретической модели пластичности Друкера-Прагера, материал арматуры и трубы принимался в виде сталей с учетом билинейной диаграммы деформирования без упрочнения.

Результаты.

Рассмотрим результаты моделирования напряженно-деформированного состояния плиты здания, имеющего защитное функциональное назначение и расположенного на некотором заглублении от поверхности грунта. За основу взята структура типового решения по серии У 01-01-/80 «Унифицированные сборно-монолитные конструкции заглубленных помещений с перекрытиями балочного типа». Эксплуатационная нагрузка $q_{st} = 15$ КПа включает собственный вес плиты 3 кПа, и вес грунта толщиной 1 м – 12 кПа. Геометрическая и расчетная схемы плиты показаны на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Плита покрытия заглубленного сооружения:
а) план; б) твердотельная модель; в) поперечное сечение**

Использовался фибробетон, имеющий сопротивление растяжению в 4 МПа, сопротивление сжатию 22 МПа. Первоначально выполнялась верификация модели путем оценки предельного статического нагружения. В нелинейном расчете получено значение предельного статического нагружения равномерно распределенной нагрузкой $q_{st,lim} = 41,5$ кПа. Прогиб конструкции при органичениях СП 63.1330, СП 297.1325800 по деформациям материалов составил 8,3 см. Напряженно-деформированное состояние показано на рисунке 3.

Как видно из расчета, при выбранных механических характеристиках, разрушение конструкции происходит по нормальным сечениям. Напряжения в поперечной арматуре на приопорных участках не превышают 170 МПа. До достижения уровня нагрузки в 20 кПа плита и балки работают на изгиб с наличием растянутой и сжатой зон, при дальнейшем увеличении нагрузки фибробетон плиты по всей высоте ее сечения начинает работать на растяжение, затем плита разрушается, арматура ее нижней сетки начинает работать по схеме вантового механизма.

Теперь рассмотрим моделирование динамического нагружения импульсной нагрузкой с переменной площадью удара, моделируемого формулой (5). Для этого разделим плиту по площади на 5 участков (рисунок 4 а), описывающих сценарий распространения импульса, и будем использовать временные функции (рисунок 4 б) для каждой из нагрузок $q_1 - q_3$. При этом эксплуатационная нагрузка q_4 возрастает в течение 0,5 с и остается постоянной на всем интервале времени интегрирования. Распределение нагрузки во времени показано на рисунке 3 в, оно соответствует варианту нагружения, показанному на рисунке 1 в.

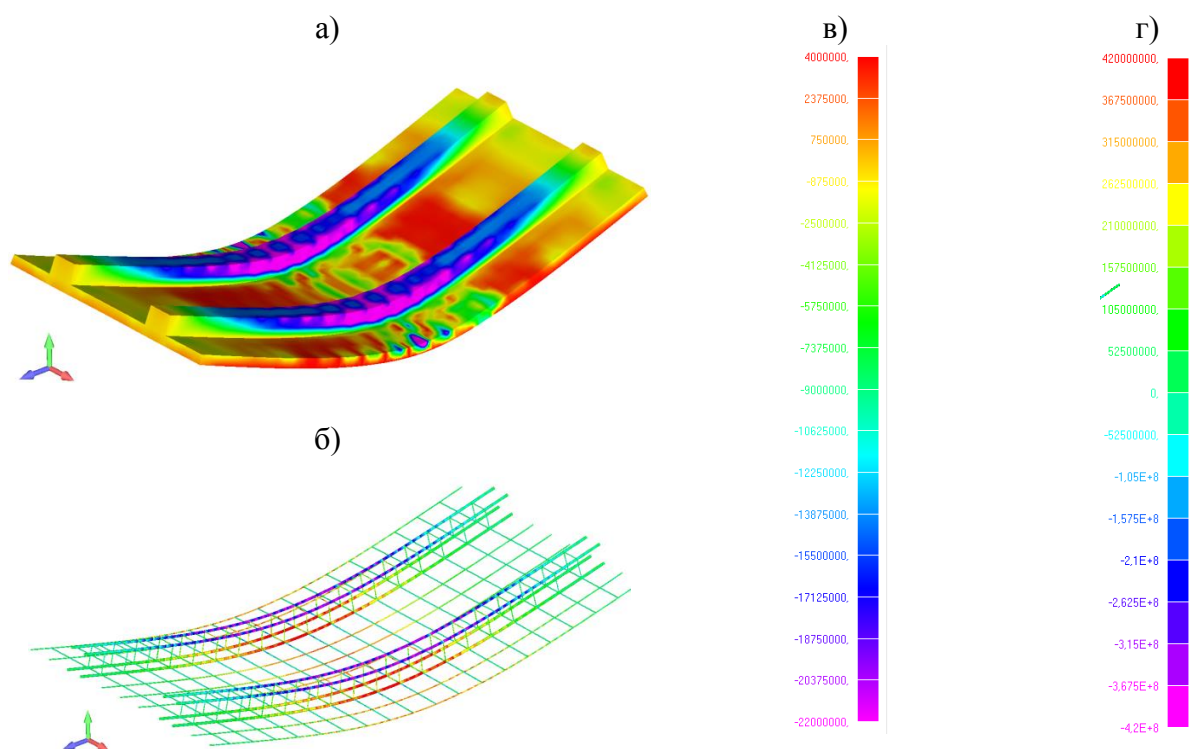


Рисунок 3 – Напряжения в фибробетоне:
а) и в арматуре; б) в предельном статическом нагружении; в) - г) шкалы напряжений

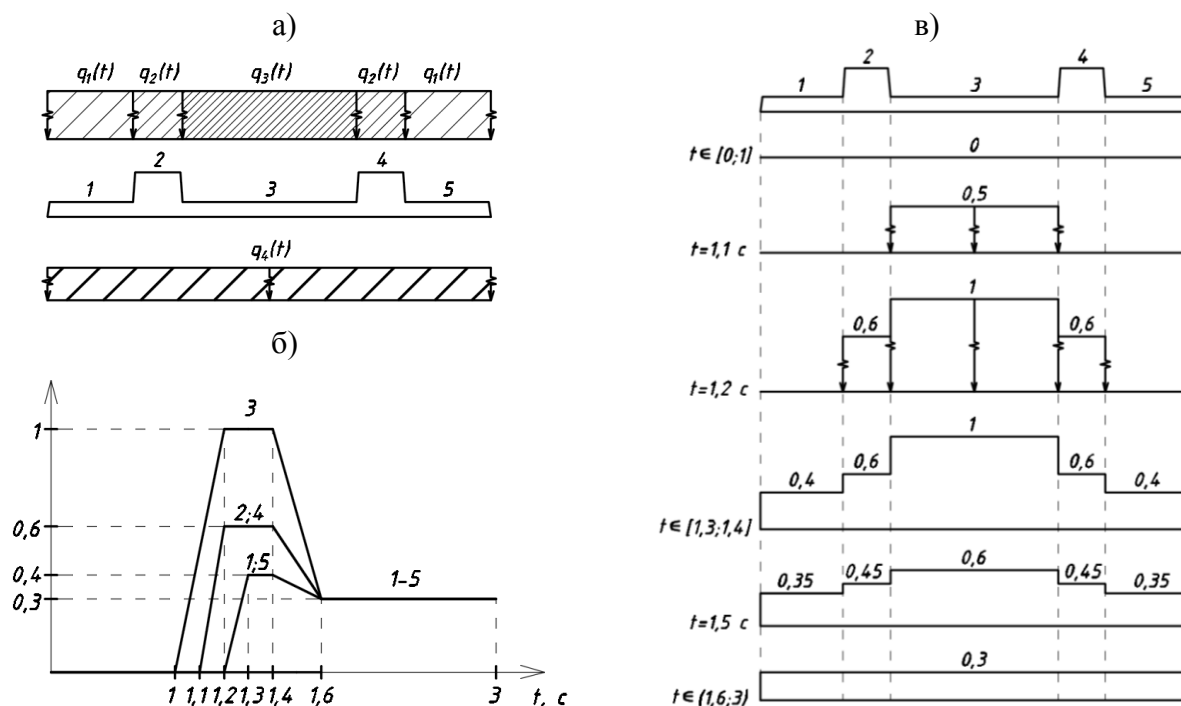


Рисунок 4 – Моделирование приложения импульсной нагрузки

Динамический анализ выполнялся для двух случаев опорных закреплений. Первый с опиранием плиты на податливую опору в виде стальной трубы, второй – с опиранием на жесткую опору. Расчет показал, что при уровне максимального импульса динамической нагрузки в 28 кПа·сек система с жесткими опорами разрушается, в то время как с податливыми еще обладает несущей способностью. Остаточный уровень нагрузки в

$0,3q\forall\{q_1, q_2, q_3\}$ Приближенно моделирует дополнительную нагрузку от грунта с нарушенной в результате динамического воздействия структурой.

Качественная ситуация по распределению напряжений в фибробетоне во времени в результате действия динамической нагрузки показана на рисунке 5. Шкала напряжений такая же как на рисунке 3 а.

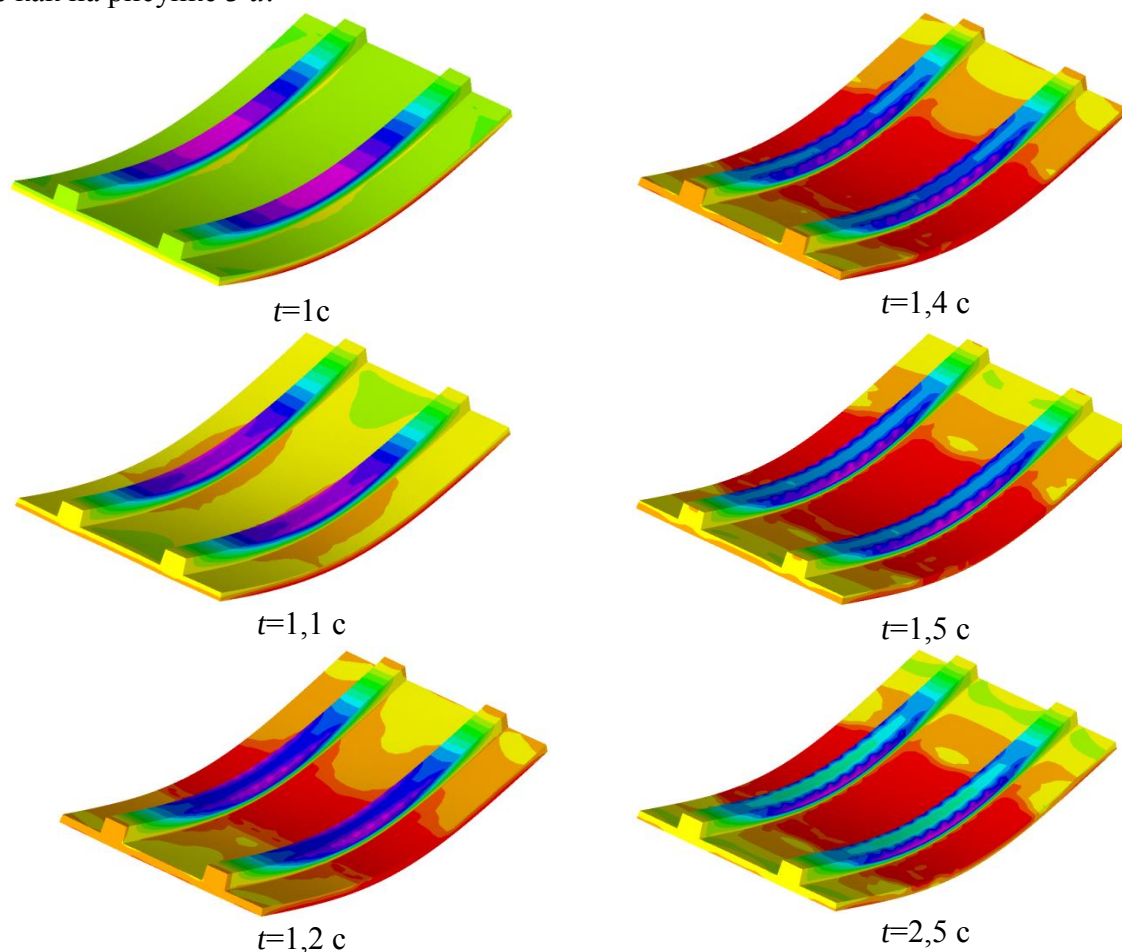


Рисунок 5 – Распределение нормальных напряжений при изгибе во времени при наличии податливой опоры (условно не показана)

Можно отметить, что после момента времени 1,4 секунды напряжения в верхних фибрах сжатого фибробетона начинают уменьшаться, что можно интерпретировать как разрушение. Сжатая зона смещается вниз в вертикальном направлении. Изменение эквивалентных напряжений Мизеса в верхней и нижней арматуре во времени показано на рисунке 6. Напряжения в верхней арматуре достигают предела текучести в 420 МПа в интервал времени от 1,3 до 1,5 с. Анализ картины сдвиговых деформаций в бетоне и эквивалентных напряжений в поперечной арматуре показал, что прочность фибробетона по наклонному сечению в приопорных зонах при заданном шаге и диаметре поперечной арматуры обеспечена. Имеет место лишь местное образование трещин непосредственно над опорами на глубину, не превышающую толщину защитного слоя.

Анализ работы податливой опоры в виде прямошовной электросварной трубы показал, что при уровне импульса в 28 кПа·сек напряжения в стенках достигают предела текучести. При этом представляется перспективным исследование влияние жесткости трубы на демпфирование колебаний. Следует отметить, что при больших вертикальных смещениях трубы моделирование опоры необходимо выполнять с использованием конечных элементов, моделирующих зазор и определяющих начало фазы деформирования опоры как абсолютно жесткого тела. Распределение напряжений по длине для податливой опоры показано на рисунке 7 а, б.

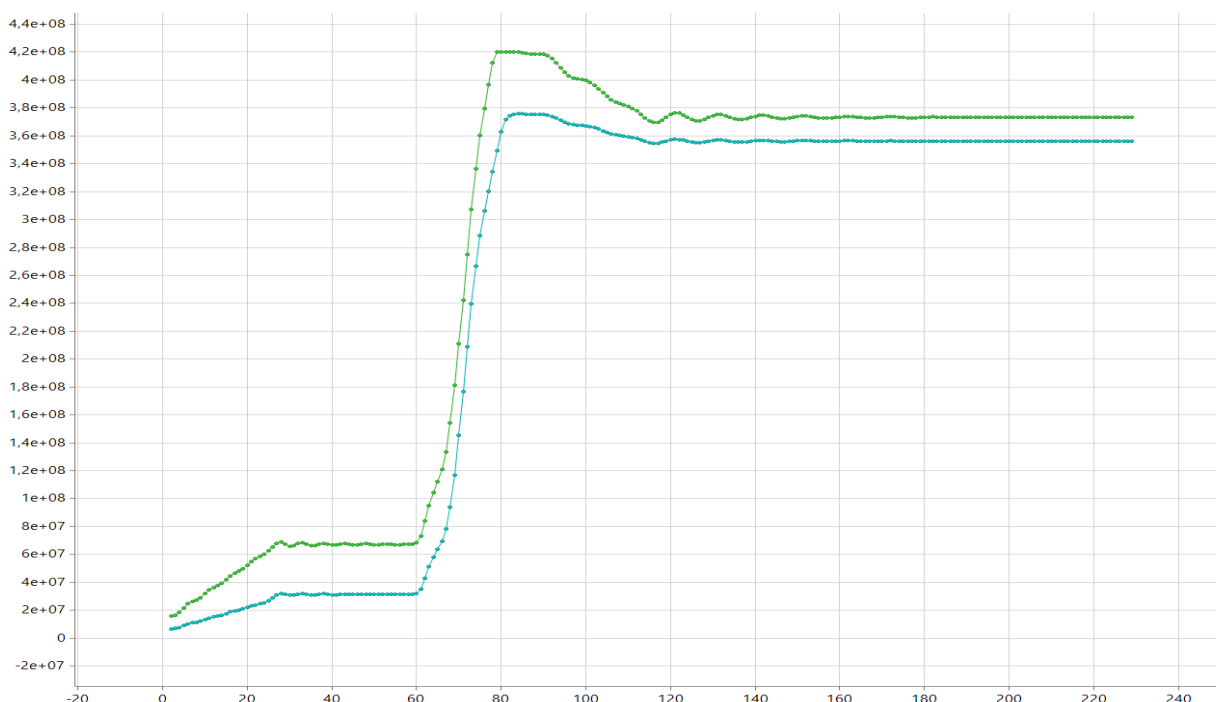


Рисунок 6 – Распределение эквивалентных напряжений Мизеса во времени для верхней продольной арматуры (кривая сверху) и для нижней продольной арматуры (кривая снизу)

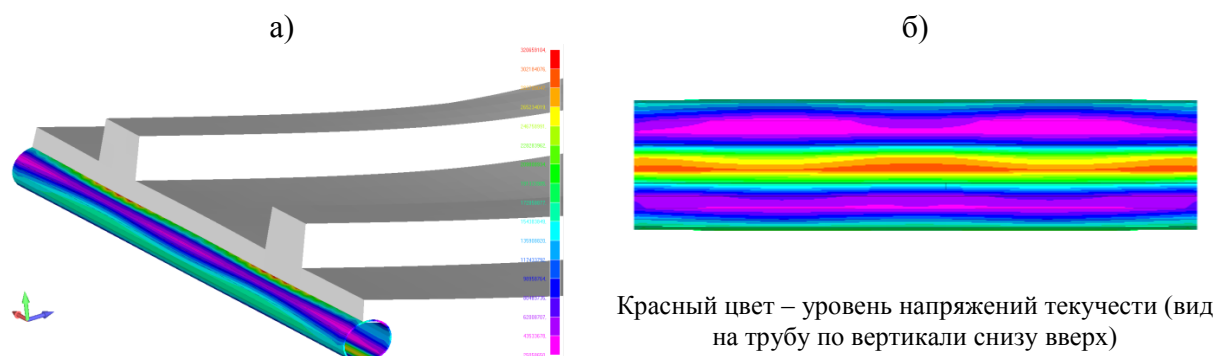


Рисунок 7 – Распределение эквивалентных напряжений Мизеса по длине трубы в момент времени $t=1,2$ с (а), изображение с увеличенным в 3 раза поперечным масштабом (б)

Дискуссия. В рассматриваемых расчетах использовался общий коэффициент демпфирования, учитывающий конструктивное и инерционное демпфирование. Его значение принималось равным 0,1. Количественная оценка компонент напряженно-деформированного состояния конструкции при решении задач данного типа существенно зависит как от демпфирующих свойств материалов конструкций, так и от демпфирования среды. Однако экспериментальных данных для конкретно такой и аналогичных задач в литературе не приводится. Кроме того, демпфирование колебаний в рассматриваемой задаче существенно зависит от податливостей опор и их упругопластических свойств. Поэтому при проектировании целесообразно решать задачу поиска рациональных жесткостей опор. Это можно сделать с использованием эволюционных алгоритмов [20] или метода деформируемого многогранника [21].

При решении нелинейных задач использовался модифицированный метод Ньютона-Рафсона в сочетании с методом деления отрезка пополам со значением невязки по силам, равный 0,001. При этом на каждом шаге динамического расчета использовалось до 25 итераций.

Выводы

Разработан подход к численному моделированию динамического поведения фиброжелезобетонных плит с учетом переменного во времени пятна импульсной ударной нагрузки. Установлено, что при действии такой нагрузки введение податливых опор способствует повышению механической безопасности и снижению материалоемкости конструкций. Показана эффективность введения податливой опоры в виде круглой трубы, что привело к обеспечению локализации разрушения для заданного значения нагрузки по сравнению с жестким опиранием. В частном случае установлено, что разрушение конструкции при рассматриваемом импульсном воздействии происходит по фибробетону, при этом учитывается наличие рабочей арматуры в сжатой зоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колчунов В.И., Туен Ву.Н., Нижегородов Д.И. Динамический отклик конструктивной системы здания с конечным числом степеней свободы при особом воздействии // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 10. С. 1337-1345.
2. Savin S.Yu., Kolchunov V.I. Dynamic behavior of reinforced concrete column under accidental impact // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Т. 17. No. 3. Pp. 120-131.
3. Трекин Н.Н., Крылов В.В. К вопросу о несущей способности железобетонных плит на продавливание при динамическом нагружении на объектах наземной космической инфраструктуры // Научный аспект. 2018. Т. 7. № 4. С. 771-778.
4. Федорова Н.В., Ильющенко Т.А., Медянкин М.Д., Инсафутдинов А.Р. Особенности динамических догрузений железобетонных элементов конструктивных систем при гипотетическом удалении одной из несущих конструкций и трещинообразовании // Строительство и реконструкция. 2019. № 2 (82). С. 72-80.
5. Li Y., Aoude H. Influence of steel fibers on the static and blast response of beams built with high-strength concrete and high-strength reinforcement. Eng. Struct. Elsevier, 2020. Vol. 221. Pp. 111031.
6. Zhang C., Abedini M., Mehrmashhadi J. Development of pressure-impulse models and residual capacity assessment of RC columns using high fidelity Arbitrary Lagrangian-Eulerian simulation. Eng. Struct. Elsevier, 2020. Vol. 224. Pp. 111219.
7. Momeni M. et al. Damage evaluation of H-section steel columns under impulsive blast loads via gene expression programming. Eng. Struct. Elsevier, 2020. Vol. 219. Pp. 110909.
8. Nam J.W. et al. Analytical study of finite element models for FRP retrofitted concrete structure under blast loads // Int. J. Damage Mech. 2009. Vol. 18. No. 5. Pp. 461-490.
9. Radchenko P., Batuev S., Radchenko A. Fracture of Protective Structures from Heavy Reinforcing Cement During Interaction with High-velocity Impactor. Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2021. No. 6(14). Pp. 779-786. doi:10.17516/1997-1397-2021-14-6-779-786
10. Тонких Г.П., Кумпяк О.Г., Галютдинов З.Р. Расчет прочности защитных сооружений гражданской обороны на податливых опорах в виде сминаемых вставок кольцевого сечения // Технологии гражданской безопасности. 2020. Т. 17. № 4 (66). С. 94-97.
11. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Strength of concrete structures under dynamic loading В сборнике: AIP Conference Proceedings. Proceedings of the II All-Russian Scientific Conference of Young Scientists "Advanced Materials in Technology and Construction". 2016. С. 070006.
12. Galyautdinov Z.R. Deformation of reinforced concrete slabs on yielding supports under short-time dynamic loading // В сборнике: AIP Conference Proceedings. 2017. С. 040002.
13. Тамразян А.Г., Алексейцев А.В. Эволюционная оптимизация нормально эксплуатируемых железобетонных балочных конструкций с учетом риска аварийных ситуаций // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 9. С. 45-50.
14. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary optimization of reinforced concrete beams, taking into account design reliability, safety and risks during the emergency loss of supports // В сборнике: E3S Web of Conferences. 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019. С. 04005.
15. Alekseytsev A.V. Mechanical safety of reinforced concrete frames under complex emergency actions // Magazine of Civil Engineering. 2021. No. 3 (103). С. 10306.
16. Генийев Г.А. Об оценке динамических эффектов в стержневых системах из хрупких материалов // Бетон и железобетон. 1993. № 3. С. 25.
17. Чернуха Н.А. Особенности расчета сооружений на взрывные воздействия в среде SCAD // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 1. С. 12-22.

18. Mkrtichev O.I., Savenkov A.Y. Modeling of blast effects on underground structure // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019. No. 15(4). Pp. 111-122.
19. Castedo R., Natale M., López L.M., Sanchidrián J.A., Santos A.P., Navarro J., Segarra P. Estimation of Jones-Wilkins-Lee parameters of emulsion explosives using cylinder tests and their numerical validation // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* Volume 112, December 2018. Pp. 290-301.
20. Алексейцев А.В. Поиск рациональных параметров строительных конструкций на основе многокритериальной эволюционной оптимизации // *Промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 7. С. 18-22.
21. Серпик И.Н., Курченко Н.С. Об определении рациональных параметров систем адаптации металлических рам к запроектным воздействиям // *Строительство и реконструкция*. 2012. № 6 (44). С. 56-62.

REFERENCES

1. Kolchunov V.I., Tuyen Vu.N., Nizhegorodov D.I. Dinamicheskiy otklik konstruktivnoy sistemy zda-niya s konechnym chislom stepeney svobody pri osobom vozdeystvii // *Vestnik MGSU*. 2021. T. 16. No. 10. Pp.1337-1345.
2. Savin S.Yu., Kolchunov V.I. Dynamic behavior of reinforced concrete column under accidental impact // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. T. 17. No. 3. Pp.120-131.
3. Trekin N.N., Krylov V.V. K voprosu o nesushchey sposobnosti zhelezobetonnykh plit na prodavlivaniye pri dinamicheskom nagruzhении na ob"yektakh nazemnoy kosmicheskoy infrastruktury // *Nauchnyy aspekt*. 2018. T. 7. No. 4. Pp. 771-778.
4. Fedorova N.V., Il'yushchenko T.A., Medyankin M.D., Insafutdinov A.R. Osobennosti dinamicheskikh dogruzhений zhelezobetonnykh elementov konstruktivnykh sistem pri gipoteticheskom udalenii odnoy iz ne-sushchikh konstruktсий i treshchinoobrazovanii // *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2019. No. 2 (82). Pp. 72-80.
5. Li Y., Aoude H. Influence of steel fibers on the static and blast response of beams built with high-strength concrete and high-strength reinforcement. *Eng. Struct.* Elsevier, 2020. Vol. 221. Pp. 111031.
6. Zhang C., Abedini M., Mehrmashhadi J. Development of pressure-impulse models and residual capacity assessment of RC columns using high fidelity Arbitrary Lagrangian-Eulerian simulation. *Eng. Struct.* Elsevier, 2020. Vol. 224. Pp. 111219.
7. Momeni M. et al. Damage evaluation of H-section steel columns under impulsive blast loads via gene expression programming. *Eng. Struct.* Elsevier, 2020. Vol. 219. Pp. 110909.
8. Nam J.W. et al. Analytical study of finite element models for FRP retrofitted concrete structure under blast loads // *Int. J. Damage Mech.* 2009. Vol. 18. No. 5. Pp. 461-490.
9. Radchenko P., Batuev S., Radchenko A. Fracture of Protective Structures from Heavy Reinforcing Cement During Interaction with High-velocity Impactor. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. 2021. No. 6(14). Pp. 779-786. doi:10.17516/1997-1397-2021-14-6-779-786
10. Tonkikh G.P., Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R. Raschet prochnosti zashchitnykh sooruzheniy grazhdanskoy oborony na podatlivykh oporakh v vide sminayemykh vstavok kol'tsevogo secheniya // *Tekhnologii grazhdanskoy bez-opasnosti*. 2020. T. 17. No. 4 (66). Pp. 94-97.
11. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. Strength of concrete structures under dynamic loading V sbornike: AIP Conference Proceedings. Proceedings of the II All-Russian Scientific Conference of Young Scientists "Advanced Materials in Technology and Construction". 2016. Pp. 070006.
12. Galyautdinov Z.R. Deformation of reinforced concrete slabs on yielding supports under short-time dynamic loading // V sbornike: AIP Conference Proceedings. 2017. Pp. 040002.
13. Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V. Evolyutsionnaya optimizatsiya normal'no ekspluatiruyemykh zhelezobetonnykh balochnykh konstruktсий s uchetom riska avariynykh situatsiy // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2019. No. 9. Pp. 45-50.
14. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Evolutionary optimization of reinforced concrete beams, taking into account design reliability, safety and risks during the emergency loss of supports // V sbornike: E3S Web of Conferences. 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019. P. 04005.
15. Alekseytsev A.V. Mechanical safety of reinforced concrete frames under complex emergency actions // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. No. 3 (103). P. 10306.
16. Geniyev G.A. Ob otsenke dinamicheskikh effektiv v sterzhnevnykh sistemakh iz khrupkikh materialov // *Beton i zhelezobeton*. 1993. No. 3. P. 25.
17. Chernukha N.A. Osobennosti rascheta sooruzheniy na vzryvnyye vozdeystviya v srede SCAD // *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*. 2014. No. 1. Pp. 12-22.
18. Mkrtichev O.I., Savenkov A.Y. Modeling of blast effects on underground structure // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019. No. 15(4). Pp. 111-122.
19. Castedo R., Natale M., López L.M., Sanchidrián J.A., Santos A.P., Navarro J., Segarra P. Estimation of Jones-Wilkins-Lee parameters of emulsion explosives using cylinder tests and their numerical validation // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* Volume 112, December 2018. Pp. 290-301.

20. Alekseytsev A.V. Poisk ratsional'nykh parametrov stroitel'nykh konstruktсий na osnove mnogokriterial'noy evolyutsionnoy optimizatsii // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2019. No. 7. Pp. 18-22.

21. Serpik I.N., Kurchenko N.S. Ob opredelenii ratsional'nykh parametrov sistem adaptatsii metal-licheskikh ram k zaproyektnym vozdеystviyam // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2012. No. 6 (44). Pp. 56-62.

Информация об авторах:

Алексеев Анатолий Викторович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия,

доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции».

E-mail: aalexw@mail.ru

Курченко Наталья Сергеевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции».

E-mail: ms.kurchenko@mgsu.ru

Сазонова Светлана Андреевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия,

студент, специальность 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений».

E-mail: s.sazonovaa17@mail.ru

Information about authors:

Alekseytsev Anatoliy V.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

doctor of engineering, associate professor of department «Concrete and reinforced concrete structures».

E-mail: aalexw@mail.ru

Kurchenko Natalia S.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

Ph.D of Engineering, associate professor of department «Concrete and reinforced concrete structures».

E-mail: ms.kurchenko@mgsu.ru

Sazonova Svetlana An.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

student, specialty 08.05.01 «Construction of unique buildings and structures».

E-mail: s.sazonovaa17@mail.ru