

## МНОГОУРОВНЕВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДИССИПАТИВНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ ИЗ ЭФФЕКТИВНЫХ ВИДОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА В ОСОБЫХ РАСЧЕТНЫХ СИТУАЦИЯХ

*А. А. Лизогуб<sup>1</sup>, И. В. Белкина<sup>2</sup>, А. П. Воробей<sup>3</sup>, Т. В. Каленюк<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> М. т. н., мл. науч. сотр. НИЧ, БрГТУ, Брест, Беларусь, p\_332\_14lizogub@mail.ru

<sup>2</sup> М. т. н., мл. науч. сотр. НИЧ, БрГТУ, Брест, Беларусь, lutaja-95@mail.ru

<sup>3</sup> К. т. н., ст. науч. сотр. НИЧ, БрГТУ, Брест, Беларусь, phdavarabei@gmail.com

<sup>4</sup> Ассистент каф. ТБСМ, БрГТУ, Брест, Беларусь, tvkalianiuk@g.bstu.by

### Реферат

В работе обоснована необходимость в разработке подходов и методов проектирования диссипативных строительных сооружений из эффективных видов железобетона. Представлены основные элементы стратегии проектирования диссипативных конструктивных систем в особых расчетных ситуациях. Приведены экспериментальные и теоретические исследования.

**Ключевые слова:** многоуровневое проектирование, диссипативная система, напрягающий фибробетон, живучесть, энергетический подход.

## MULTI-LEVEL DESIGN OF DISSIPATIVE BUILDING STRUCTURES FROM EFFICIENT TYPES OF REINFORCED CONCRETE IN ACCIDENTAL DESIGN SITUATIONS

*A. A. Lizahub, I. V. Belkina, A. P. Vorobej, T. V. Kalenyuk*

### Abstract

The article substantiates the need to develop approaches and methods for designing dissipative building structures made from effective types of reinforced concrete. The main elements of the design strategy for dissipative structural systems in accidental design situations are presented. Experimental and theoretical studies are presented.

**Keywords:** multi-level design, dissipative system, self-stressing fiber-reinforced concrete, robustness, energy approach.

### Введение

Применение передовых конструктивных решений, использование новых эффективных материалов в строительстве, а также развитие отечественной и мировой строительной отрасли в целом приводит к необходимости в усовершенствовании существующих и разработке новых методов проектирования и оценки зданий и сооружений.

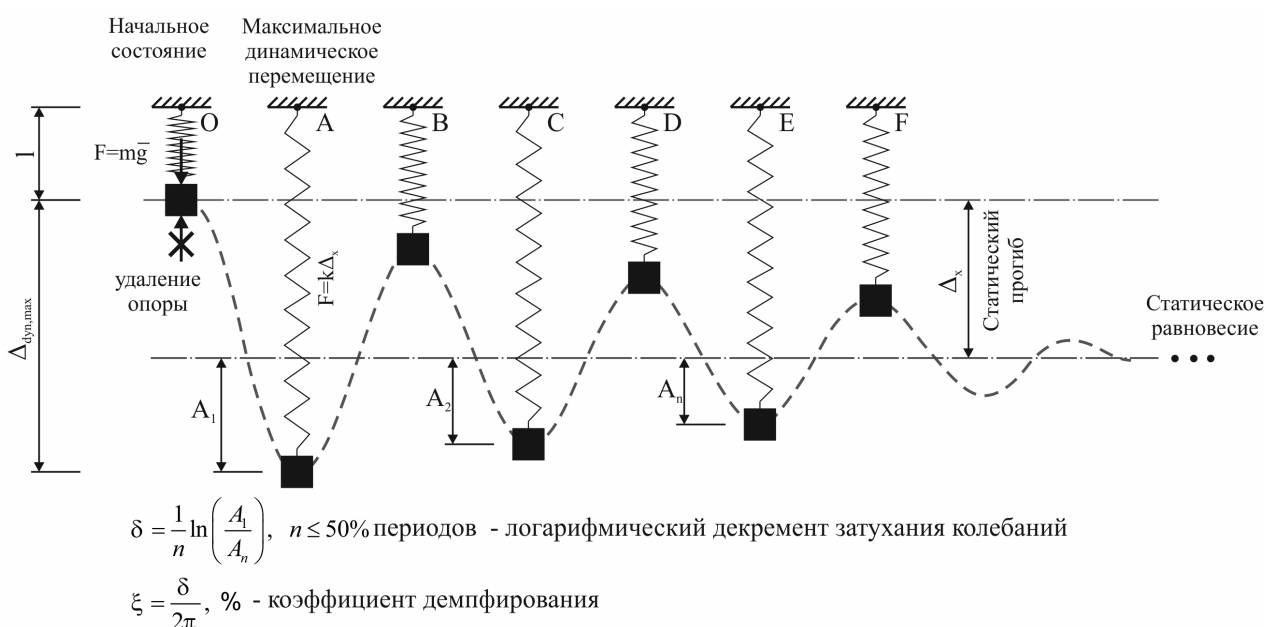
В соответствии с действующими нормативными документами Республики Беларусь и других стран в области строительства все здания и сооружения должны удовлетворять требованиям надежности, эксплуатационной пригодности, долговечности и живучести. Однако вплоть до настоящего времени подходы к назначению требуемого уровня надежности в особых расчетных ситуациях и методы оценки живучести зданий и сооружений базируются на национальном опы-

те проектирования, а не на последовательных, научно обоснованных методиках анализа рисков, что приводит к неэффективному использованию материальных ресурсов для обеспечения безопасности людей.

Широкое распространение в строительстве получают новые эффективные виды железобетона (высокопрочные, самонапряженные, дисперсно-армированные). Тем не менее, исследование влияния новых материалов на пластическую деформативность и диссипативность железобетонных конструкций в особых расчетных ситуациях изучено недостаточно.

Таким образом, возникает необходимость в разработке новых подходов и методик, ориентированных на практическое применение при проверке живучести зданий и сооружений из эффективных видов железобетона.

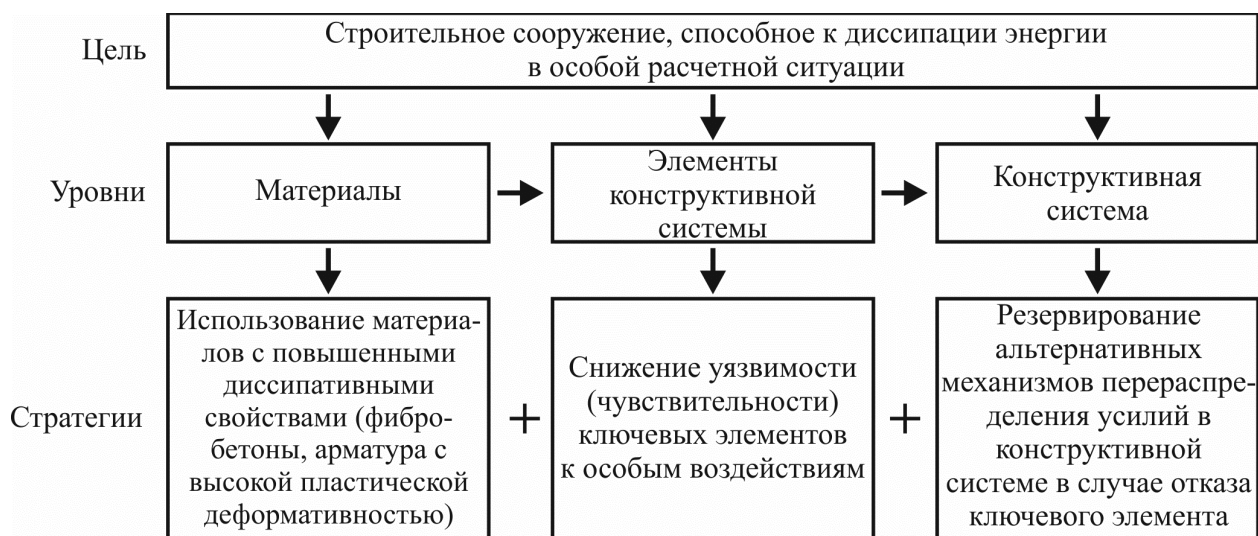
Реализация особого события (например, взрыва или удара) чаще всего имеет динамический характер. При этом в системе, подверженной особому воздействию, возникают колебания (рисунок 1).



**Рисунок 1** – Диссипация энергии колебательной системы

При колебаниях диссипативных систем происходит рассеивание энергии в окружающей среде, в материалах конструкции, в узлах сопряжения конструктивных элементов, а также в локальных участках развития пластических деформаций (пластических шарнирах). Эти потери вызываются силами неупругого сопротивления – диссипативными силами, на преодоление которых непрерывно и необратимо расходуется энергия колебательной системы или источника колебаний.

Цель исследований заключается в разработке подходов и методов многоуровневого проектирования зданий и сооружений из эффективных видов железобетона, способных к рассеиванию (диссипации) механической энергии, обусловленной реализацией особых воздействий, таких как, взрыв бытового газа, удар транспортного средства, просадка основания, террористическая атака, человеческие ошибки и т. д.), на уровне работы материалов, отдельных конструктивных элементов и целой конструктивной системы (рисунок 2).



*Рисунок 2 – Основные элементы стратегии проектирования диссипативных строительных сооружений из эффективных видов железобетона*

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

– получение новых экспериментальных и теоретических данных, позволяющих выявить влияние многоуровневого дисперсного армирования на прочностные, деформационные характеристики напрягающего бетона;

– проведение экспериментальных и теоретических исследований масштабных моделей фрагментов конструктивных систем для определения характера разрушения и проверки теоретических зависимостей оценки живучести в случае отказа ключевого элемента.

### **Исходные материалы и методы исследования**

Выполнен ряд экспериментальных исследований дисперсно-армированного напрягающего бетона [1]. При выполнении исследований опытные образцы изготавливали из напрягающего бетона, различных номинальных составов. Дисперсное армирование напрягающего бетона выполнялось следующими типами волокон:

- фибра стальная анкерная диаметром 0,40 мм и длиной 30 мм;
- фибра композитная базальтовая диаметром 0,80 мм и длиной 50 мм;
- фибра базальтовая диаметром 0,016 мм и длиной 12 мм;
- фибра полипропиленовая диаметром 0,05 мм и длиной 12 мм.

Проведены экспериментальные исследования двух масштабных моделей фрагмента плоского монолитного железобетонного перекрытия в случае удаления центральной опоры при статическом (образец FS-1) и динамическом (образец FS-2) нагружениях [2].

### **Результаты экспериментов и их обсуждение**

По итогам проведенных экспериментальных исследований дисперсно-армированного напрягающего бетона были получены данные, которые представлены в виде зависимостей собственных деформаций от времени для напрягающих бетонов с различной энергоактивностью [1]. Проанализировав полученные зависимости, установили, что сдерживание деформаций напрямую зависит от жесткостных параметров ограничения. Так, стальные волокна, относящиеся к высокомодульным, способны сдерживать значительные деформации расширения. При этом полипропиленовая фибра, обладая невысокими значениями модуля

упругости и коэффициента Пуассона, ожидаемо ограничивает деформации достаточно слабо. Тем не менее не раз был отмечен эффект, при котором фибробетоны с полимерным армированием достигали, а иной раз и превышали (серия III-1,6 и III-2) значения свободных деформаций неармированного образца (рисунок 3). На наш взгляд, данный эффект происходит в момент, когда постоянное увеличение объема вызывает образование дефектов структуры, но она при этом не успевает восстановиться, после чего происходит задержка роста деформаций или и вовсе спад – усадка. Наличие низко модульной микрофибры немного тормозит нарастание деформаций, при этом сокращает количество дефектов в структуре, позволяя в дальнейшем дать возможность реализовать энергию расширяющейся добавки в большей мере, нежели в дефектном материале. Данная гипотеза легла в основу предложенного способа иерархичного армирования каждого уровня напрягающего бетона (макро-, мезо-, микро-, субмикро-) соответствующими по размерам фиброволокнами. Проведенные эксперименты подтвердили данную гипотезу, из чего следует вывод, что многоуровневое дисперсное армирование является наиболее эффективным способом армирования, позволяющим достичь высоких показателей долговечности и эксплуатационной надежности. В данном случае низко модульные волокна не следует рассматривать в качестве ограничивающего элемента, поскольку основная их работа заключается в усилении цементной матрицы бетона. Ограничителем деформаций будет выступать высоко модульная макрофибра. Принимая во внимание данные условия, прогнозирование связанных деформаций с помощью деформационной модели будет нецелесообразно, так как в модели не заложены описанные механизмы, и результаты будут заведомо ложными. В таком случае остановимся на составах, в которых присутствуют высоко модульные волокна. А в случаях, где из-за усиления структуры связанные деформации значительно превысили свободные, в качестве исходных данных примем наибольшие.

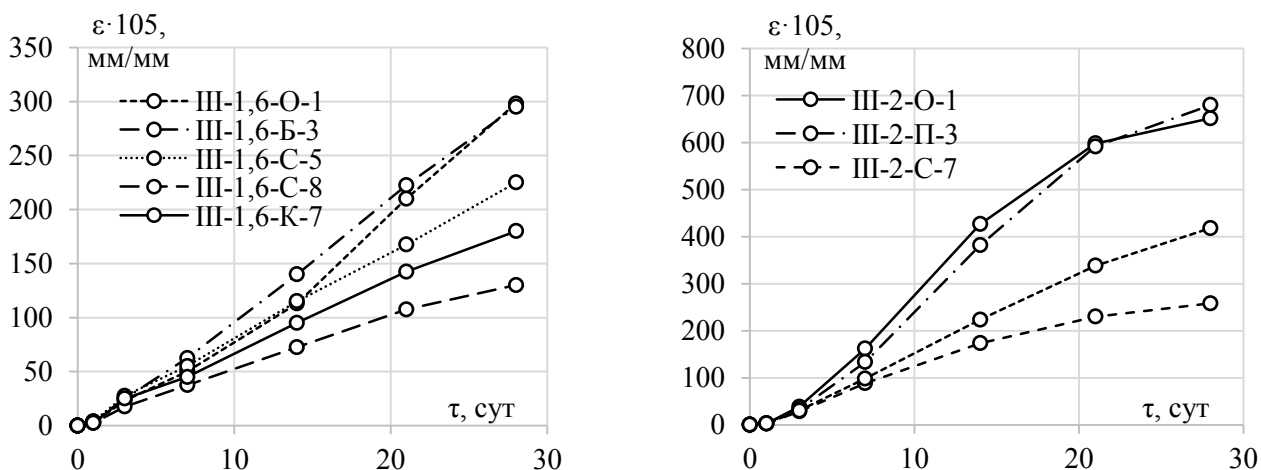
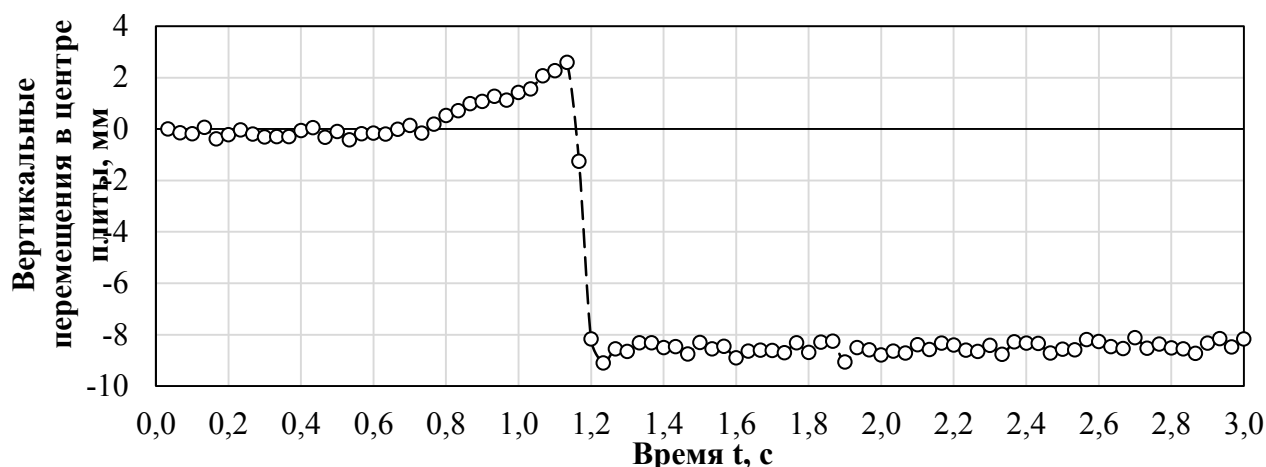


Рисунок 3 – Собственные деформации расширения для опытных образцов (серия III-1,6 и III-2)

В ходе испытаний масштабных моделей фрагмента плоского перекрытия были измерены такие параметры, как реакции в опорах, перемещения, относительные деформации бетона и арматуры в характерных местах. Испытания образца FS-1, выполненные методом статической разгрузки, позволили выявить и детально изу-

читать характерные этапы поведения конструктивной системы с плоской плитой перекрытия при удалении вертикального несущего элемента. В результате испытаний получена полная нелинейная квазистатическая реакция образца FS-1 для сценария удаления центральной колонны. Динамические испытания образца FS-2 позволили установить, что при внезапном динамическом приложении нагрузки различные механизмы сопротивления не включаются одновременно, что влияет на мгновенный динамический отклик системы. При уровне нагружения, соответствующем стадии пластического изгиба, произошло перераспределение внутренних сил и включение зарезервированных связевых элементов после реализации максимальных прогибов на первом полупериоде колебаний поврежденной системы. Диаграмма изменения вертикальных прогибов в центре плиты во времени при удалении опоры образца FS-2 представлена на рисунке 4.

Подъем плиты перед выключением из работы опоры объясняется механизмом удаления опоры. В данном случае подъем плиты компенсирует прогибы от предварительного нагружения, и может быть принят как точка нулевого отсчета вертикальных прогибов после удаления опоры.



*Рисунок 4 – Изменение вертикальных прогибов в центре плиты во времени при удалении опоры образца FS-2*

### **Заключение**

Исходя из результатов представленных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. На уровне работы материалов применение многоуровневого дисперсного армирования позволяет расширить возможности использования напрягающего бетона при проектировании диссипативных систем за счет повышения его прочностных и деформационных характеристик.

2. На уровне работы конструктивных элементов и целой конструктивной системы в особой расчетной ситуации возникают различные механизмы сопротивления прогрессирующему обрушению. Правильное понимание их происхождения и развития позволяет более рационально и безопасно проектировать диссипативные строительные сооружения, отвечающие требованиям живучести в особых расчетных ситуациях.

## Благодарности

Исследование осуществлено в рамках задания Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ) на выполнение научно-исследовательской работы (договор № Т23РНФМ-060).

## Литература

1. Павлова, И. П. Верификация модифицированной деформационной модели напрягающего фибробетона на фоне экспериментальных исследований / И. П. Павлова, И. В. Белкина, А. А. Лизогуб // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 6. Тэхніка. – 2023. – Т. 13. – № 2. – С. 74–87.
2. Tur, V. V. Experimental and theoretical study of the reinforced concrete flat slabs with the central support loss / V. V. Tur, A. V. Tur, A. A. Lizahub // Building and Reconstruction. – 2023. – Vol. 1, № 1. – С. 77–103.

УДК 624.014

## НОРМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В ОБЛАСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*В. В. Надольский*

*К. т. н., доцент, доцент кафедры технологии строительного производства БрГТУ,  
Брест, Беларусь, Nadolski@mail.by*

## Реферат

За последние десятилетия существенно возросло применение компьютерного конечно-элементного моделирования в области проектирования стальных конструкций. Многие формульные, рутинные проверки заменяются более «продвинутыми» численными моделями. Однако применение численного моделирования не отражено должным образом в нормативных документах. Данная ситуация в первую очередь осложняется интенсивным развитием этого направления, поэтому научные исследования не успевают внедрять в нормативные документы. Передовые исследования последних 10–20 лет не нашли отражения в отечественных нормах, а существующие указания устарели либо разобщены по разным частям нормативных документов. В строительных правилах по проектированию стальных конструкций СП 5.04.01-2021 содержатся только общие фразы по применению численных моделей. ТКП EN 1993 содержит более подробную информацию о типах численного анализа и указаниях по их применению, однако, учитывая то, что этот стандарт разрабатывался до 2004 г. и после этого не претерпел существенных обновлений, следует констатировать, что он также устарел. Данное обзорное исследование направлено на систематизацию типов численного анализа с указаниями по их применению при проектировании стальных строительных конструкций.

**Ключевые слова:** структурный анализ, компьютерное моделирование, численные модели сопротивления, особое воздействие, существующие конструкции.