

Главный редактор:
Колчунов В.И., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
(Россия)

Заместители главного редактора:
Гордон В.А., советник РААСН, д-р техн. наук,
проф. (Россия)
Коробко В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия)
Савин С.Ю., канд. техн. наук, доц. (Россия)
Финадеева Е.А., канд. техн. наук, доц. (Россия)

Редакция:
Акимов П.А., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
(Россия)

Бакаева Н.В., советник РААСН, д-р техн. наук,
проф. (Россия)
Бок Т., д-р техн. наук, проф. (Германия)
Булгаков А.Г., д-р техн. наук, проф. (Германия)
Данилевич Д.В., канд. техн. наук, доц. (Россия)
Ерофеев В.Т., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
(Россия)

Есаулов Г.В., акад. РААСН, д-р арх., проф. (Россия)
Карпенко Н.И., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
(Россия)

Колесникова Т.Н., д-р арх., проф. (Россия)
Колчунов В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия)
Коробко А.В., д-р техн. наук, проф. (Россия)
Король Е.А., чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук,
проф. (Россия)

Кривошапко С.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия)
Кудряшов Н.Н., канд. арх., проф. (Россия)

Лефай З., д-р техн. наук, проф. (Франция)
Мелькумов В.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия)
Орлов Р.Б., д-р техн. наук, проф. (Польша)
Птичникова Г.А., д-р арх., проф. (Россия)
Ребож Д., д-р техн. наук, проф. (Словения)
Римшин В.И., чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук,
проф. (Россия)

Тамразян А.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия)
Травуш В.И., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
(Россия)

Трещев А.А., д-р техн. наук, проф. (Россия)
Тур В.В., д-р техн. наук, проф. (Белоруссия)
Турков А.В., д-р техн. наук, проф. (Россия)
Федоров В.С., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
(Россия)

Федорова Н.В., советник РААСН, д-р техн. наук,
проф. (Россия)

Шах Р., д-р техн. наук, проф. (Германия)
Яковенко И.А., д-р техн. наук, проф. (Украина)

Исполнительный редактор:

Амелина М.А., (Россия)

Адрес редакции:
302030, Орловская обл., г. Орёл,
ул. Московская, д. 77.
Тел.: +79065704999
<http://oreluniver.ru/science/journal/sir>
E-mail: str_and_rek@mail.ru

Зарегистрировано в Федеральной службе
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство: ПИ №ФС 77-67169
от 16 сентября 2016 г.

Подписной индекс **86294**
по объединенному каталогу «Пресса России»
на сайтах www.ppressa-ru.ru и www.akc.ru

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2024

Содержание

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

- Абаев З.К., Денпур Ц.** Оценка сейсмостойкости различных конструктивных решений типового железобетонного жилого здания нелинейным статическим и динамическим методами 4
- Обернихина Я.Л., Смоляго Г.А.** Перераспределение усилий в неразрезных железобетонных балках, усиленных углепластиком под нагрузкой 23
- Овсянников С.Н., Самохвалов А.С.** Звукопередача через ограждения с малыми техническими элементами, включая воздухообменные устройства 31
- Фёдоров В.С., Купчикова Н.В., Рекунов С.С., Федосюк И. В.** Фильтрационная устойчивость грунтовых перемычек плотин как временных гидротехнических сооружений 44
- Мурашкин В.Г.** Модель деформирования бетона прошедшего длительный срок эксплуатации 61

Безопасность зданий и сооружений

- Надольский В.В.** Нормируемые значения вероятности отказа строительных конструкций 70
- Ву Нгок Туен, Федорова Н.В.** Динамический отклик железобетонного каркаса здания при сценарии удаления колонны 82

Архитектура и градостроительство

- Расторгуев С.В.** Методы изучения истории архитектуры на основе 3D моделирования 95

Строительные материалы и технологии

- Баруздин А.А., Закревская Л.В.** Рециклинг шитого полиэтилена для создания композиционных строительных материалов 112
- Шмаров И.А., Земцов В.В.** Влияние горизонтальной стационарной солнцезащиты на освещенность помещения 127
- Шубин И.Л., Стронгин А.С., Разаков М.А.** Применение искусственного интеллекта для управления инженерным оборудованием зданий 138

Editor-in-Chief
Kolchunov V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Editor-in-Chief Assistants:
Gordon V.A., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Korobko V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Savin S.Yu., candidate sc. tech., docent (Russia)
Finadeeva E.A., candidate sc. tech., docent (Russia)

Editorial Board
Akimov P.A., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Bakaeva N.V., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Bock T., doc. sc. tech., prof. (Germany)
Bulgakov A.G., doc. sc. tech., prof. (Germany)
Danilevich D.V., candidate sc. tech., docent (Russia)
Erofeev V.T., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Esaulov G.V., doc. arc., prof. (Russia)
Karpenko N.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Kolesnikova T.N., doc. arc., prof. (Russia)
Kolchunov V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Korobko A.V., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Korol E.A., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Krivoshapko S.N., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Kudryashov N.N., candidate arc., prof. (Russia)
Lafhaj Z., doc. sc. tech., prof. (France)
Melkumov V.N., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Orlovic R.B., doc. sc. tech., prof. (Poland)
Ptichnikova G.A., doc. arc., prof. (Russia)
Rebolj D., doc. sc. tech., prof. (Slovenia)
Rimshin V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Tamrazyan A.G., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Travush V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Treshev A.A., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Tur V.V., doc. sc. tech., prof. (Belorussia)
Turkov A.V., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Fedorov V.S., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Fedorova N.V., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Schach R., doc. sc. tech., prof. (Germany)
Iakovenko I.A., doc. sc. tech., prof. (Ukraine)

Managing Editor:
Amelina M.A., (Russia)

The edition address:
302030, Oryol region., Oryol,
Moskovskaya Street, 77
+79065704999
<http://oreluniver.ru/science/journal/sir>
E-mail: str_and_rek@mail.ru

Journal is registered in Russian federal service for monitoring communications, information technology and mass communications
The certificate of registration:
ПН №ФЦ 77-67169 from 16.09.2016 r.

Index on the catalogue of the «Pressa Rossi»
86294 on the websites www.pressa-ff.ru and
www.akc.ru

© Orel State University, 2024

Contents

Theory of engineering structures. Building units

- Abaev Z K., Denpur T.** Seismic performance evaluation of different design options of typical reinforced concrete residential building by nonlinear static and dynamic analyses..... 4
- Obernikhina Y. L., Smolyago G. A.** Redistribution of forces in continuous reinforced concrete beams reinforced with cfrp under load..... 23
- Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S.** Sound transmission through enclosing structures with small technical elements, including air exchange devices..... 31
- Fedorov V.S., Kupchikova N.V., Rekunov S.S. Fedosyuk I.V.** Filtration stability of soil bridges of dams as temporary hydraulic structures..... 44
- Murashkin V.G.** Secant modulus ratio for reconstructable reinforced concrete..... 61

Building and structure safety

- Nadolski V.V.** Standardized values of the failure probability of building structures..... 70
- Vu Ngoc Tuyen, Fedorova N.V.** Dynamic response of reinforced concrete building frame under column removal scenario..... 82

Architecture and urban planning

- Rastorguev S.V.** Methods of studying the history of architecture based on 3D modeling..... 95

Construction materials and technologies

- Baruzdin A.A., Zakrevskaya L.V.** Recycling of cross-linked polyethylene to create composite building materials..... 11
- Shmarov I.A., Zemtsov V.V.** The effect of horizontal stationary sun protection on the illumination of the room..... 7
- Shubin I.L., Strongin A.S., Razakov M.A.** The use of artificial intelligence to control the engineering equipment of buildings..... 13

ПОЗДРАВЛЕНИЕ С 90-ЛЕТНИМ ЮБИЛЕЕМ АКАДЕМИКА РААСН Л.С. ЛЯХОВИЧА

12 сентября 2024 г. академику РААСН, д.т.н., профессору Леониду Семеновичу Ляховичу исполняется 90 лет!

Леонид Семенович Ляхович родился в г. Ташкент 12 сентября 1934 г. В декабре 1955 года закончил Новосибирский инженерно-строительный институт (в настоящее время НГАСУ) по специальности промышленное и гражданское строительство. С 1956 года начал работу в Томском инженерно-строительном институте (в настоящее время ТГАСУ) в должности ассистента, в 1962 году успешно закончил аспирантуру на кафедре строительной механики Новосибирского инженерно-строительного института, защитив кандидатскую диссертацию.

С 1962 года Леонид Семенович трудится в ТГАСУ: вначале был старшим преподавателем, затем доцентом, в 1964 году стал заведующим кафедрой строительной механики. В 1965-1968 годах он являлся деканом строительного факультета. В 1974 году Л. С. Ляхович защитил докторскую диссертацию и с 1974 по 2008 год занимал должность проректора по научной работе ТГАСУ.

Леонид Семенович – член президиума и ученого совета РААСН, председатель совета по защите докторских и кандидатских диссертаций, председатель НТС межвузовской НТП «Архитектура и строительство» (с 1989 по 2004 год), председатель НТС конкурса грантов по фундаментальным проблемам архитектуры и строительных наук, главный редактор журнала «Вестник ТГАСУ» и член редколлегии четырех журналов из списка ВАК. Он подготовил 30 кандидатов и трех докторов наук.

Научные интересы Леонида Семеновича тесно связаны с развитием теории расчета сооружений на устойчивость и колебания, проектированием систем минимальной материалоемкости. За многолетний плодотворный труд Л. С. Ляхович неоднократно награждался почетными знаками «Победитель соцсоревнования», «Ударник пятилетки», различными юбилейными медалями, отмечался грамотами министра образования, министра строительства, губернатора Томской области, мэра г. Томска, заносился на областную, городскую и вузовскую Доски почета, а также на Аллею трудовой славы строителей Томской области. Леонид Семенович отмечен благодарственным письмом председателя Совета Федерации РФ С. М. Миронова за научную и законодательную деятельность, большой вклад в подготовку высококвалифицированных кадров.

Уважаемый Леонид Семенович, коллектив редакции научно-технического журнала «Строительство и реконструкция» от всей души поздравляет Вас с юбилеем, желает крепкого здоровья, благополучия и новых творческих успехов в научно-педагогической деятельности и во всех Ваших начинаниях во благо отечественного образования и строительной науки!



З. К. АБАЕВ¹, Ц. ДЕНПУР²

¹Владикавказский научный центр РАН, г. Владикавказ, Россия

²Министерство инфраструктуры и транспорта, г. Тхимпху, Бутан

ОЦЕНКА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ТИПОВОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЖИЛОГО ЗДАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМ СТАТИЧЕСКИМ И ДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДАМИ

Аннотация. Представлено сравнительное исследование сейсмостойкости типового пятиэтажного железобетонного жилого здания в г. Тхимпху, Бутан, спроектированного согласно старым и новым индийским нормам. Для анализа использовались две нелинейные модели объекта исследования, разработанные в программе STERA 3D. Оценка сейсмостойкости производилась с помощью метода спектра несущей способности (capacity spectrum method, CSM) и нелинейного анализа истории отклика (response history analysis, RHA) для трех записей землетрясений.

Конструктивные повреждения элементов и этажей зданий, оцениваются с помощью индексов повреждаемости с использованием масштабированных записей землетрясений. Результаты показывают, что здания, спроектированные в соответствии с новыми индийскими нормами, обладают большей сейсмостойкостью по сравнению со зданиями, спроектированными в соответствии со старыми. Более того, оценка индексов повреждаемости для здания, спроектированного с использованием новых норм, показывает, что здание имеет более равномерное распределение повреждений по этажам и предотвращает конструктивные повреждения на уровне обрушения при рассматриваемом максимальном масштабном движении грунта.

Ключевые слова: оценка сейсмостойкости, нелинейный статический анализ, нелинейный динамический анализ, спектр несущей способности, индекс повреждаемости.

Z. K. ABAEV¹, T. DENPUR²

¹Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russia

²Ministry of Infrastructure and Transport, Thimphu, Bhutan

SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION OF DIFFERENT DESIGN OPTIONS OF TYPICAL REINFORCED CONCRETE RESIDENTIAL BUILDING BY NONLINEAR STATIC AND DYNAMIC ANALYSES

Abstract. A comparative study on the seismic performances of typical five-story RC residential buildings designed with old and new Indian codes is presented. Accordingly, two three-dimensional models of a building designed with the old and new Indian codes are developed using STERA 3D software. The seismic performances are evaluated using the Capacity Spectrum Method (CSM) and non-linear Response History Analysis (RHA) for three input ground motions, in addition, the structural damage estimates given by damage indices are compared under scaled ground motions.

Results show that the building designed with the new Indian codes provide reduced structural responses when compared to that designed with old Indian codes. Furthermore, the assessment of the damage indices for the building designed using the new codes shows that the building has a more even damage dispersion over the floors and prevents collapse-level structural damage under the considered maximum scaled ground motion.

Keywords: seismic performance evaluation, nonlinear static analysis, response history analysis, capacity spectrum, damage index.

Введение

Бутан, расположенный среди сейсмически активного Гималайского региона, сталкивается с уникальными проблемами в обеспечении конструктивной надежности своей застройки [1]. В связи с недавним введением в действие новых сейсмических норм, возникает острая необходимость в оценке сейсмостойкости существующих зданий, особенно тех, которые были построены в соответствии с предыдущими нормами проектирования [2,3].

Железобетонные конструкции являются популярным выбором для жилых зданий в сейсмоопасных регионах благодаря своей прочности и долговечности [4,5]. Однако их сейсмостойкость в значительной степени зависит от норм проектирования, использовавшихся во время строительства [6]. Традиционные методы линейно-упругого анализа, несмотря на эффективность вычислений, часто неточно оценивают несущую способность и деформативность ж/б конструкций при сейсмических воздействиях [7].

Оценка сейсмостойкости существующих железобетонных зданий требует применения передовых аналитических методов, способных отразить сложное нелинейное поведение, присущее таким системам [8]. Нелинейные методы, включая метод спектра несущей способности (*Capacity Spectrum Method, CSM*) и анализ истории отклика (*Response History Analysis, RHA*) или нелинейный динамический анализ, обеспечивают более глубокое понимание реакции сооружения на сейсмическое воздействие с учетом физической и геометрической нелинейности [9].

Используя *CSM* и *RHA*, данное исследование предлагает всестороннюю оценку сейсмостойкости объекта исследования – 5-ти этажного каркасного железобетонного здания, запроектированного согласно старым и новым нормам. В то время как *CSM* позволяет провести глобальную оценку сейсмостойкости сооружения, *RHA* предлагает более детальное понимание локализованного поведения и потенциальных механизмов повреждения [10]. Такой комбинированный подход позволяет провести надежную оценку уязвимости здания и обосновать решения о потенциальной потребности в усилении [11–13].

Значение этого исследования выходит за пределы Бутана, особенно учитывая сейсмическую уязвимость многих регионов России, где большое количество сооружений были построены в соответствии с устаревшими сейсмическими нормами. Рассматриваемая методика сравнения сейсмостойкости зданий построенных в соответствии с различными версиями норм может стать одним из этапов модернизации отечественной практики и разработки соответствующих норм и рекомендаций [14].

Модели и методы

Целью данного исследования является изучение и сравнение сейсмического отклика типового жилого железобетонного здания, спроектированного по старым и новым индийским нормам. Для этого были разработаны две модели с использованием различных сечений элементов, сконструированных согласно прежним и новым нормам.

Были проведены нелинейный статический анализ (*CSM*) и нелинейный динамический анализ (*RHA*) для оценки сейсмостойкости указанных моделей. Несмотря на то, что для *RHA* предпочтительнее использовать набор большего количества записей землетрясений, данное исследование ограничивается только тремя (две сгенерированные записи и одна запись реального землетрясения) из-за ограниченности исторических данных, полученных в результате прошлых сейсмических событий в Бутане. Кроме того, оценка ущерба на целевых моделях оценивается с помощью индексов повреждаемости (*Damage Index*) при масштабированных записях реальных землетрясений.

В Бутане при проектировании каркасных зданий из железобетона обычно руководствуются двумя нормативными документами – индийскими стандартами IS 1893:2002 и IS 19320:1993. Эти нормы содержат положения по сейсмостойкому проектированию сооружений и описывают рекомендации по расчету зданий на сейсмические воздействия и конструктивному исполнению ж/б конструкций. В 2016 году оба документа были

пересмотрены в результате землетрясений, произошедших после их первоначальной публикации. В табл. 1 представлены важные положения, введенные или пересмотренные из старых индийских норм и включенные в новые.

Таблица 1 – Разница в старых и новых нормах IS 1893

IS 1893:2002 (Старые)	IS 1893:2016 (Новые)
Пункт, касающийся момента инерции, не упоминается. Расчет проводится с учетом полного момента инерции, т.е. рассматривается неразрушенное сечение.	Рассматривается сечение элементов с трещинами в соответствии с п. 6.4.3.1, при этом эквивалентный момент инерции определяется, как указано ниже: $I_{eq} = 0.70 I_{gross}$ для колонн, $I_{eq} = 0.35 I_{gross}$ для балок, где I_{eq} – эквивалентный момент инерции, I_{gross} – полный момент инерции.
Относительная прочность балок и колонн в месте соединения не учитывается.	Относительная прочность балок и колонн в месте соединения в соответствии с п. 7.2.1 считается, как указано ниже. $\Sigma M_c \geq 1.4 \Sigma M_b$ где M_c – момент сопротивления колонны в месте соединения, M_b – момент сопротивления балки в месте соединения.

В индийских нормах рассматриваются три типа грунта по сейсмическим свойствам: тип 1 – скалистый, твердый грунт; тип 2 – грунт средней категории; тип 3 – мягкий, слабый грунт. На рисунке 1 представлен график изменения коэффициента динамичности (*Spectral Acceleration Coefficient*) для каждого типа грунта. Рассматриваемый объект исследования (г. Тхимпху) расположен на средних грунтах (тип 2).

Для нелинейного анализа во времени рассматриваются три записи землетрясений (см. рисунок 2). Два движения грунта продолжительностью 120 секунд генерируются с помощью процедуры спектрального преобразования (*spectral matching*) записей обратным преобразованием Фурье для нормативного спектра ускорений [15]. Первая запись преобразуется в соответствии с целевым расчетным спектром (т.е. спектром отклика ускорения, $h = 5\%$ по IS 1893:2002), со случайными фазами. Второе – преобразуется путем масштабирования до целевого расчетного спектра с сохранением фаз записи Кобе 1995 г., зарегистрированной на станции Тоторо (TOT), Япония. В качестве третьей записи рассматривается реальная запись землетрясения в Непале в 2015 году, измеренная на станции Катманду (KAT), полученная из базы Центра инженерных данных о сильных движениях грунта, США [16]. Результаты процедуры спектрального соответствия для сгенерированных записей представлены на рисунке 3.

Объект исследования

На рисунке 4 показано типовое существующее 5-ти этажное жилое железобетонное здание, расположенное в городе Тхимпху. Сечения элементов балок и колонны были запроектированы с учетом 4х комбинаций нагрузок согласно индийским нормам. Модель, запроектированная с использованием старых индийских норм, далее называется «OLD», а модель, спроектированная с использованием новых – «NEW». Расчетный сейсмический вес составляет 11160 кН и 12205 кН для моделей OLD и NEW соответственно, расчетная сила в основании сооружения для двух моделей составляет 893 кН и 976 кН соответственно.

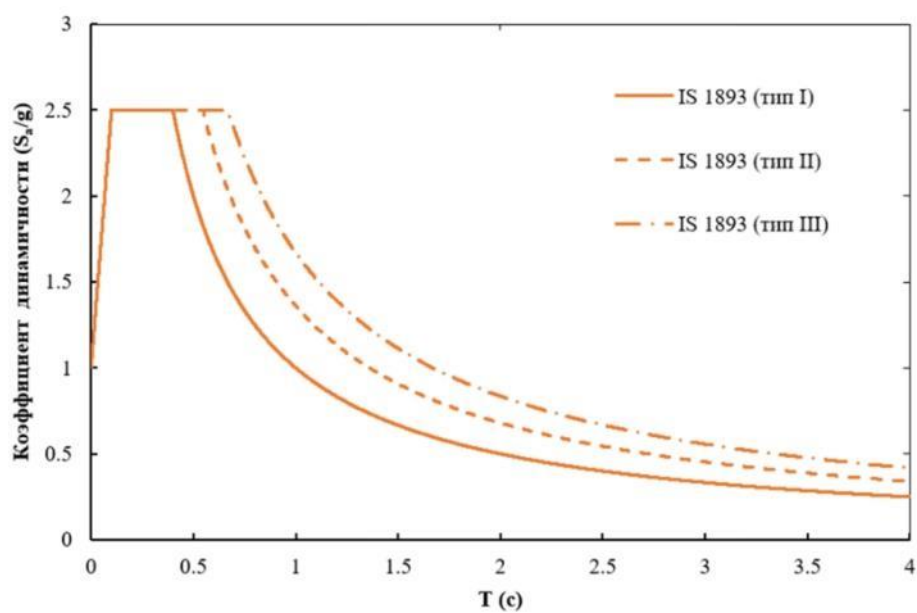


Рисунок 1 – Коэффициент динамичности IS 1893

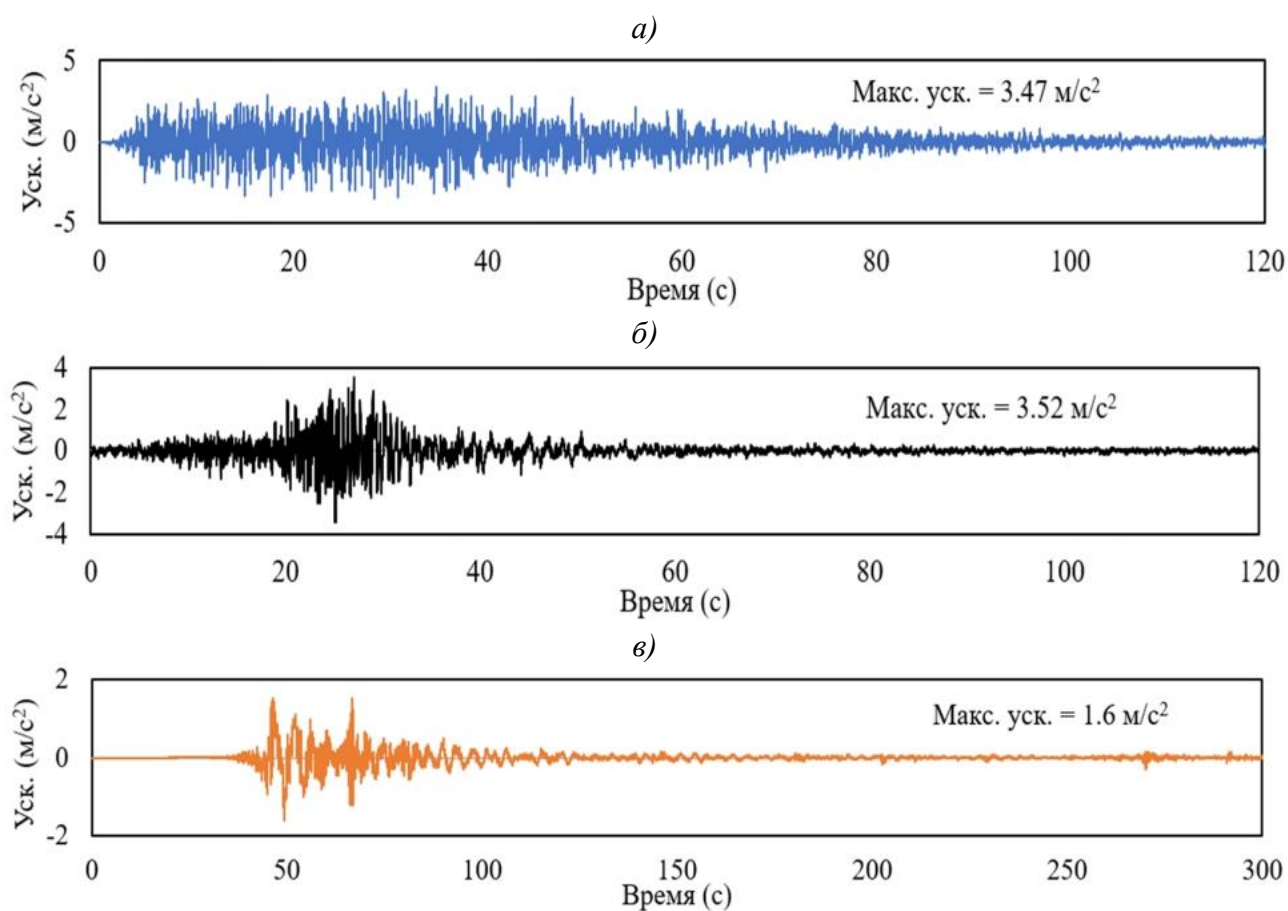


Рисунок 2 – Записи ускорений грунта: а) Сгенерированная-1 (случайная фаза), б) Сгенерированная-2 (фаза Кобе, TOT_90), в) реальная запись землетрясения KATNP_360

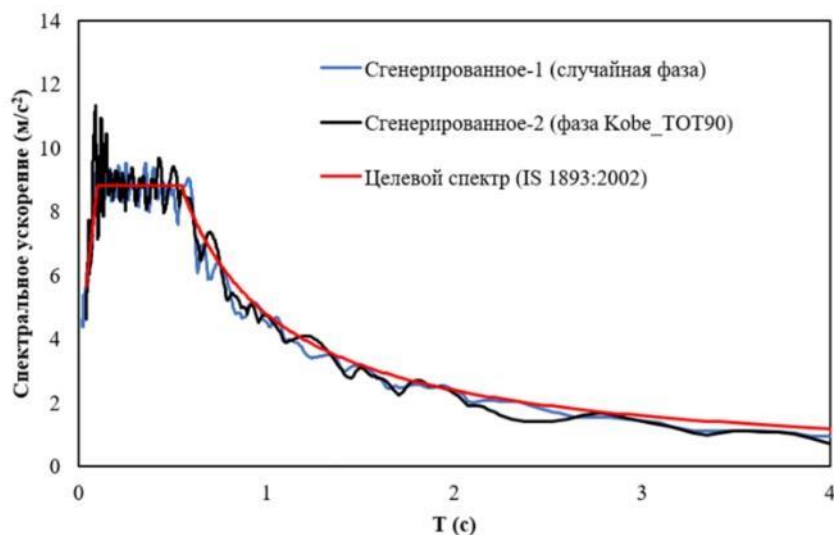
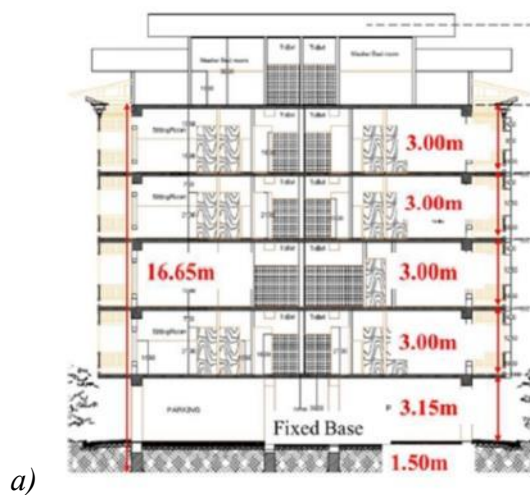
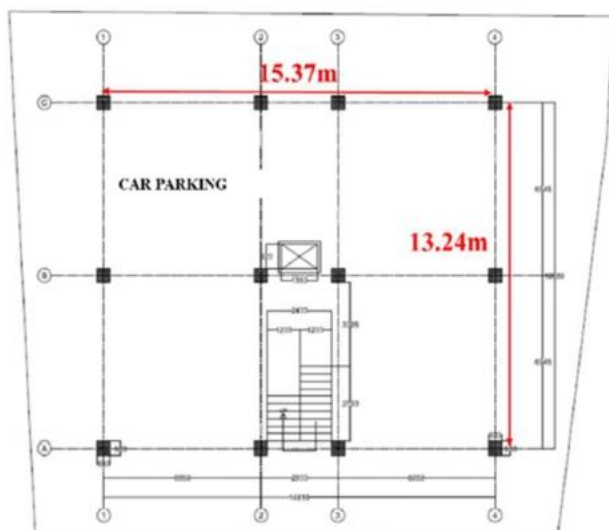


Рисунок 3 – Результаты процедуры спектрального соответствия для сгенерированных записей



а)



б) в)

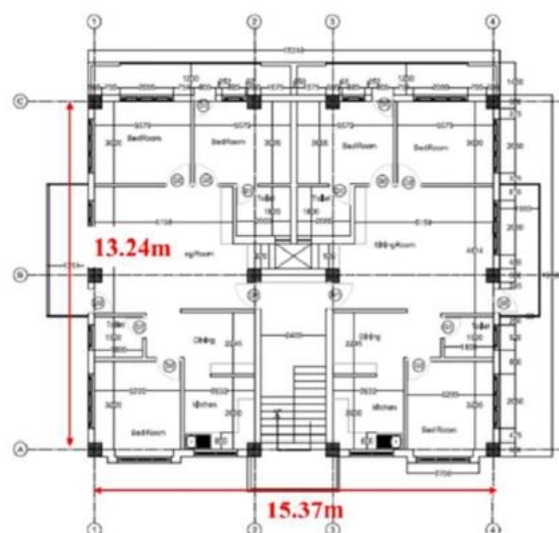


Рисунок 4 – Объект исследования: а) разрез, б) план первого этажа, в) план типового этажа

В таблицах 2 и 3 показаны окончательные расчетные сечения колонн, продольная и поперечная арматура для моделей *OLD* и *NEW* соответственно. Для балок и колонн принята арматура с пределом прочности 500 МПа и прочностью бетона на сжатие 25 МПа. В обеих моделях используются балки шириной 0,3 м и высотой 0,45 м на всех этажах, поскольку в них наблюдалась лишь небольшая разница в расчетном армировании.

Таблица 2 – Армирование колонн для модели *OLD*

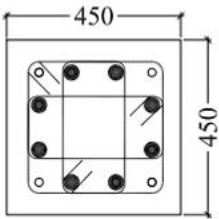
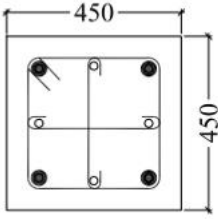
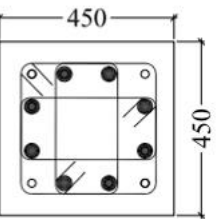
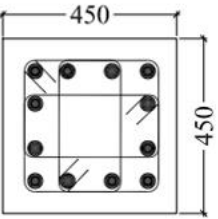
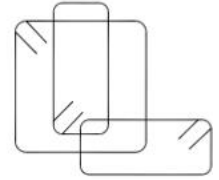
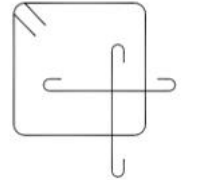
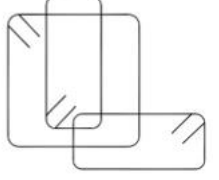
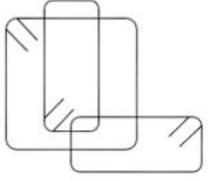
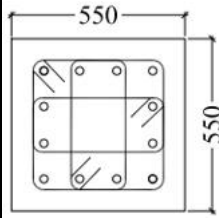
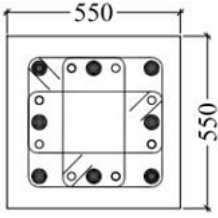
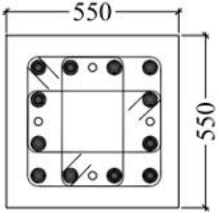
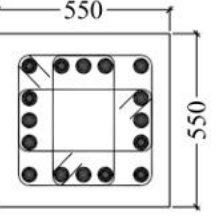
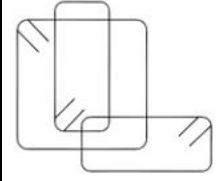
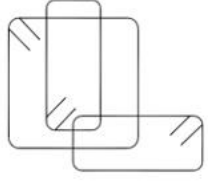
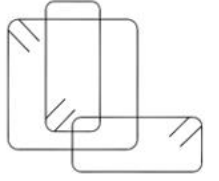
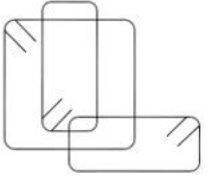
Обозначение	C-1	C-2	C-3	C-4
Поперечное сечение (мм)				
Продольное армирование (мм)	● 8Ø20 ○ 4Ø12	● 8Ø25 ○ 4Ø10	● 8Ø25 ○ 4Ø16	● 12Ø20
Поперечное армирование (мм)	 Ø8 шаг 100	 Ø8 шаг 100	 Ø8 шаг 100	 Ø8 шаг 100

Таблица 3 – Армирование колонн для модели *NEW*

Обозначение	C-1	C-2	C-3	C-4
Поперечное сечение (мм)				
Продольное армирование (мм)	○ 12Ø20	● 8Ø25 ○ 8Ø20	● 12Ø25 ○ 4Ø20	● 16Ø25
Поперечное армирование (мм)	 Ø8 шаг 100	 Ø8 шаг 100	 Ø8 шаг 100	 Ø8 шаг 100

Расчет производится в свободно распространяемой программе *STERA 3D*. Программа *STERA 3D* предназначена для выполнения нелинейных расчетов на динамические воздействия зданий и сооружений. Балки представлены линейным элементом с нелинейными пружинами изгиба на обоих концах и нелинейной пружиной сдвига в центре (см. рисунок 5). Для изгибной

пружины и пружины сдвига используется деградирующая трехлинейная модель гистерезиса и пико-ориентированная полилинейная модель гистерезиса.

Колонна также представлена линейным элементом с нелинейными мульти-пружинами на обоих концах для учета двунаправленных изгибных и осевых эффектов (см. рисунок 6).

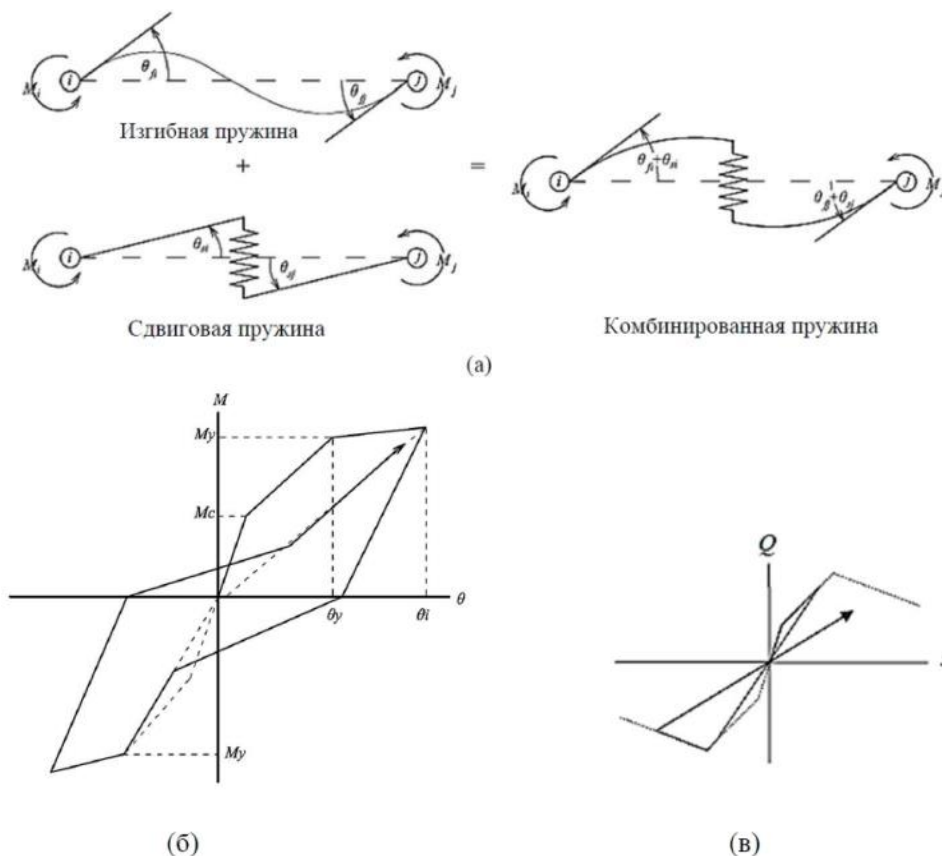


Рисунок 5 – Элемент балки: а) нелинейная изгибная и сдвиговые пружины, б) модель трехлинейного деградирующего гистерезиса для изгибной пружины, в) пико-ориентированная полилинейная модель для пружины сдвига

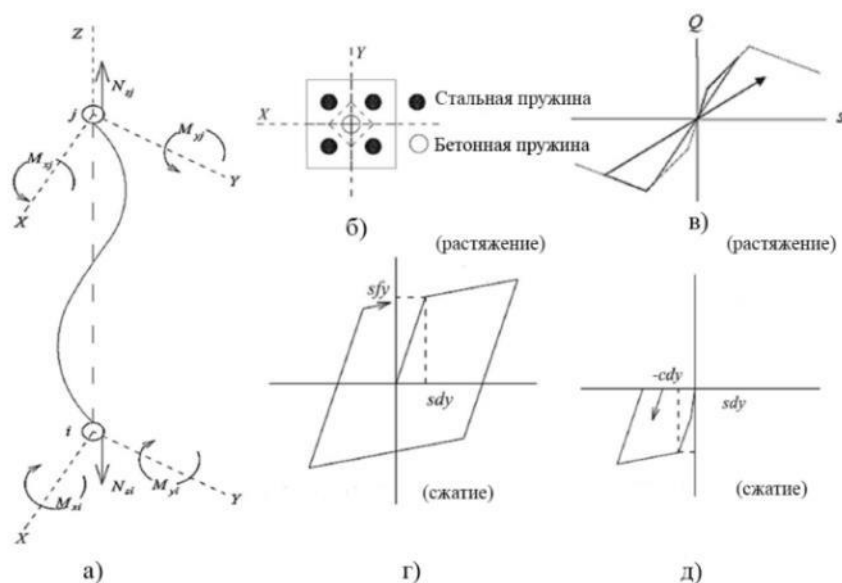


Рисунок 6 – Элемент колонны: а) мульти-пружинное сечение, б) угловые стальные и центральная бетонная пружины, в) пико-ориентированная полилинейная модель для пружины сдвига, г) модель гистерезиса для стали, д) модель гистерезиса для бетона

В центре линейного элемента используются две пружины сдвига для двух направлений с пико-ориентированной полилинейной гистерезисной моделью. Билинейные гистеретические модели рассматриваются для стали (растяжение и сжатие) и бетона (только сжатие). Дистрибутив программы, а также детальное техническое руководство доступны пользователям всех стран на сайте программы [17]. Автором настоящей работы был выполнен перевод руководства пользователя на русский язык, который также доступен на сайте программы.

Программа автоматически вычисляет соответствующие расчетные параметры в зависимости от геометрических характеристик и армирования сечения в соответствии с методиками, представленными в техническом руководстве программы [17]. К примеру, для колонны С-1 моменты инерции $I_x = I_y$ составляют 394000 см² и 930000 см² для моделей *OLD* и *NEW* соответственно.

На рисунке 7 показаны две модели объекта исследования, спроектированных по старым и новым индийским нормам. Первая форма колебаний для обеих моделей соответствует направлению Y. Период колебаний основного тона T_1 моделей *OLD* и *NEW* составляет 0,897 с и 0,785 с соответственно.

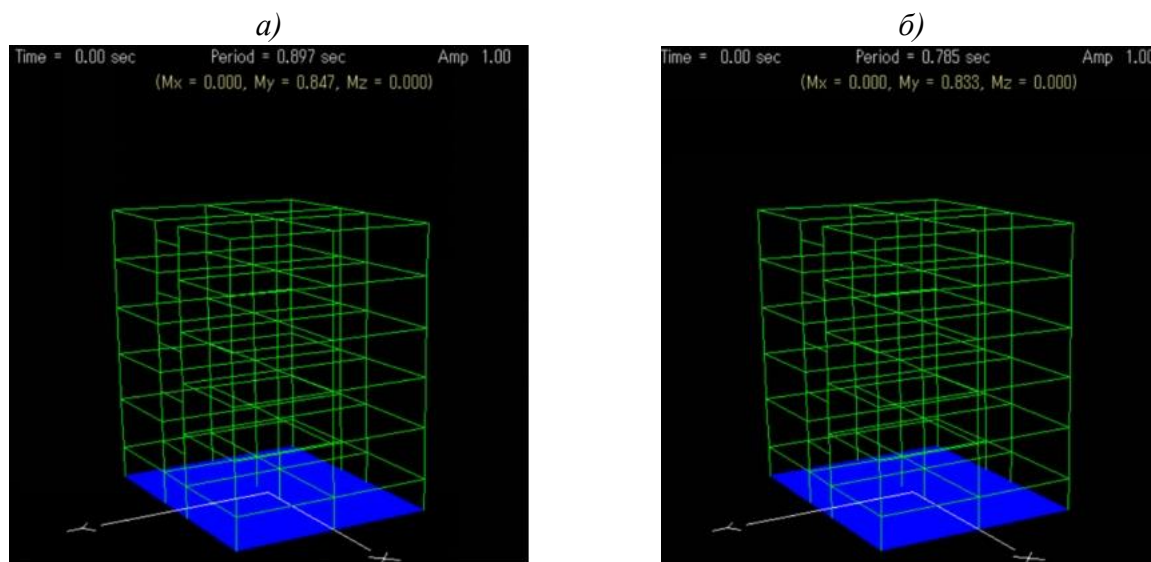


Рисунок 7 – Объект исследования: а) модель *OLD*, б) модель *NEW*

Критерием оценки сейсмостойкости объектов исследования является угол перекоса этажа (*story drift angle*, R_i). Под углом перекоса этажа понимается отношение перекоса этажа на высоту этажа, выраженный в долях единицы. Для всех методов оценки сейсмостойкости, используемых в настоящем исследовании приняты уровни конструктивных повреждений, указанные в рекомендациях Японской ассоциации проектировщиков [18] на основе угла перекоса этажа (см. таблица 4). Дополнительно рассматривается поперечная сила Q_i по высоте.

Таблица 4 – Уровни повреждений в зависимости от угла перекоса этажа [18]

Уровень повреждений	Без повреждений	Незначительные повреждения	Значительные повреждения	Тяжелые повреждения	Обрушение
Угол перекоса этажа, R_i	$R_i \leq 1/300$	$1/300 < R_i \leq 1/150$	$1/150 < R_i \leq 1/100$	$1/100 < R_i \leq 1/75$	$R_i > 1/75$

Результаты исследования и их анализ

Был проведен нелинейный статический (*Pushover*) анализ объектов исследования. Здания были доведены до уровня обрушения, т.е. до целевого угла поворота $R_i = 1/50$. Сила в основании, полученная для обоих зданий, была меньше в направлении Y , следовательно, рассматривается несущая способность в этом направлении.

Результаты анализа, представленные на рисунке 8б, показывают разницу в несущей способности в 37% при монотонном увеличении нагрузки. Модель *NEW* имеет несущую способность 3405 кН, в то время как модель *OLD* – 2487 кН. Рисунок 8а демонстрирует возможные уязвимые места с максимальным перекосом второго этажа в модели *NEW* и первого этажа в модели *OLD*.

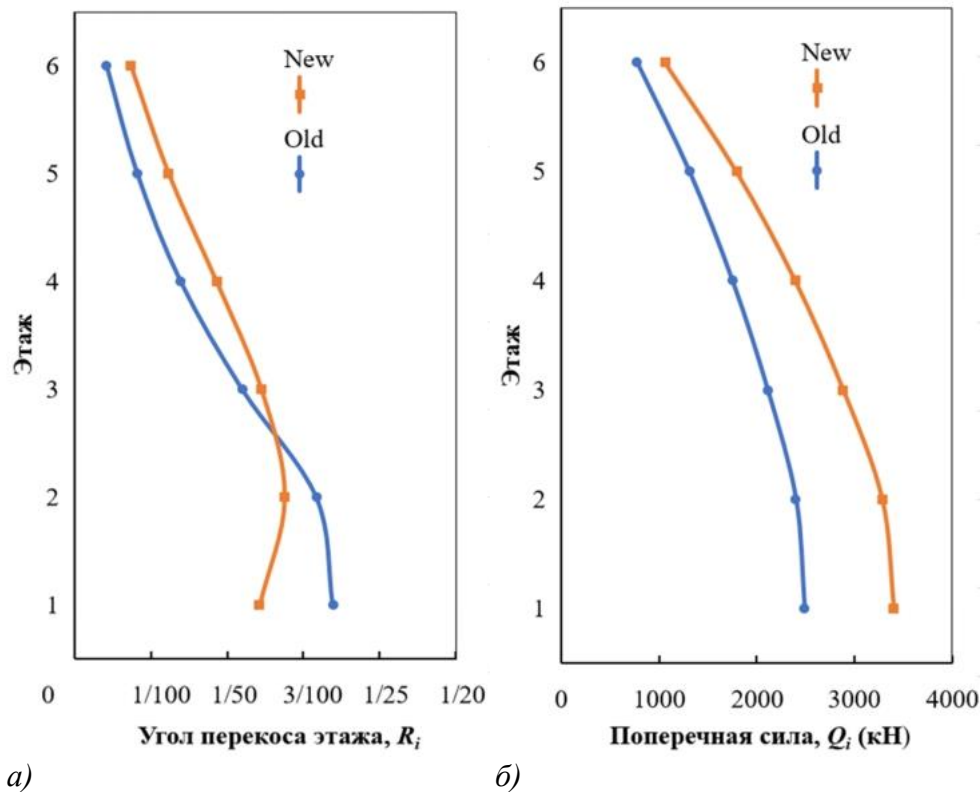


Рисунок 8 – Результаты нелинейного статического анализа:
а) угол перекоса этажа, б) поперечная сила

Максимальный отклик нелинейного динамического анализа во времени для трех записей землетрясений также получен в направлении Y и представлен на рисунке 9. Существенная разница отклика моделей *OLD* и *NEW* наблюдается при расчете на реальное землетрясение. При почти одинаковых силах, максимальный угол перекоса этажа для модели *OLD* составляет $1/80$, в то время как для модели *NEW* – $1/143$.

Метод спектра несущей способности

Оценка сейсмостойкости объектов исследования проводилась с помощью метода спектра несущей способности (*capacity spectrum method, CSM*). *CSM* используется во всем мире для быстрой оценки вероятности повреждения конструкции при землетрясении. Этот метод в основном включает в себя графические процедуры, которые могут быть легко применены как к существующим зданиям, так и к новым проектам. Ее суть заключается в нахождении точки пересечения спектров несущей способности и нормативного спектра,

которая представляет собой приблизительный отклик сооружения (см. рисунки 10–11). Более подробную информацию о самой процедуре нахождения характеристической точки можно найти в работе [19].

Расчет по *CSM* показывает, что второй этаж модели *OLD* получит повреждения, близкие к разрушению, при угле перекоса этажа 1/78, в то время как модель *NEW* получит серьезные повреждения при угле перекоса этажа 1/98. Модель *NEW* подвергается воздействию силы на 26% больше, чем модель *OLD*.

Рисунок 11 иллюстрирует *CSM* с использованием спектра ускорений реального землетрясения *KATNP* в направлении *Y* для каждого объекта исследования. Результаты *CSM* показали, что модель *NEW* с максимальным углом перекоса этажа 1/128 получит меньше повреждений по сравнению с моделью *OLD* с большим углом перекоса этажа 1/86.

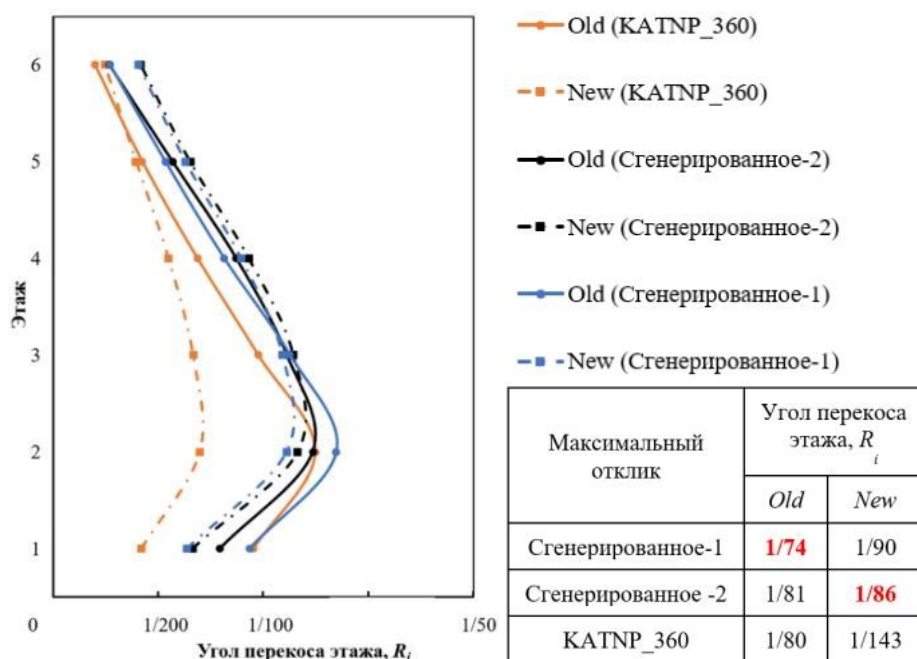


Рисунок 9 – Результаты нелинейного динамического анализа во времени

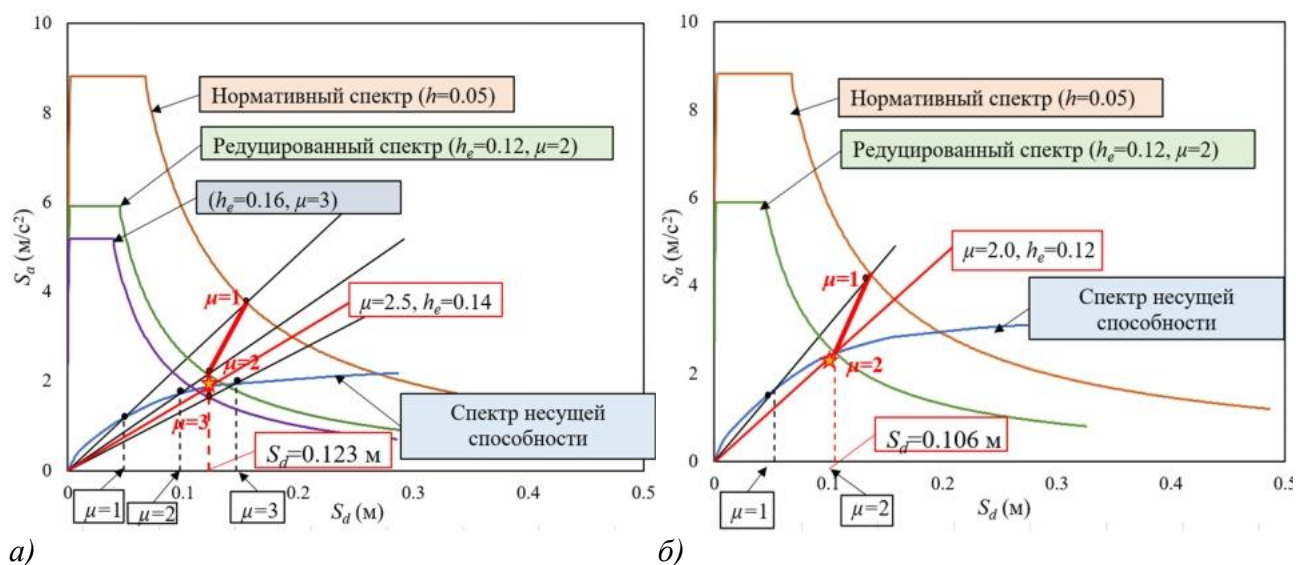


Рисунок 10 – *CSM* для нормативного спектра: а) модель *OLD*, б) модель *NEW*

S_a – спектральное ускорение, S_d – спектральное перемещение, μ – коэффициент податливости, h_e – коэффициент эквивалентного демпфирования

При сравнении с результатами *RHA*, отклик, полученный с помощью *CSM* для спектра *KATNP*, показал хорошую сходимость как по значениям, так и по формам (см. рисунок 12). *CSM* требует меньше вычислительных усилий и времени, что делает его удобным и применимым при исследовании большого количества зданий.

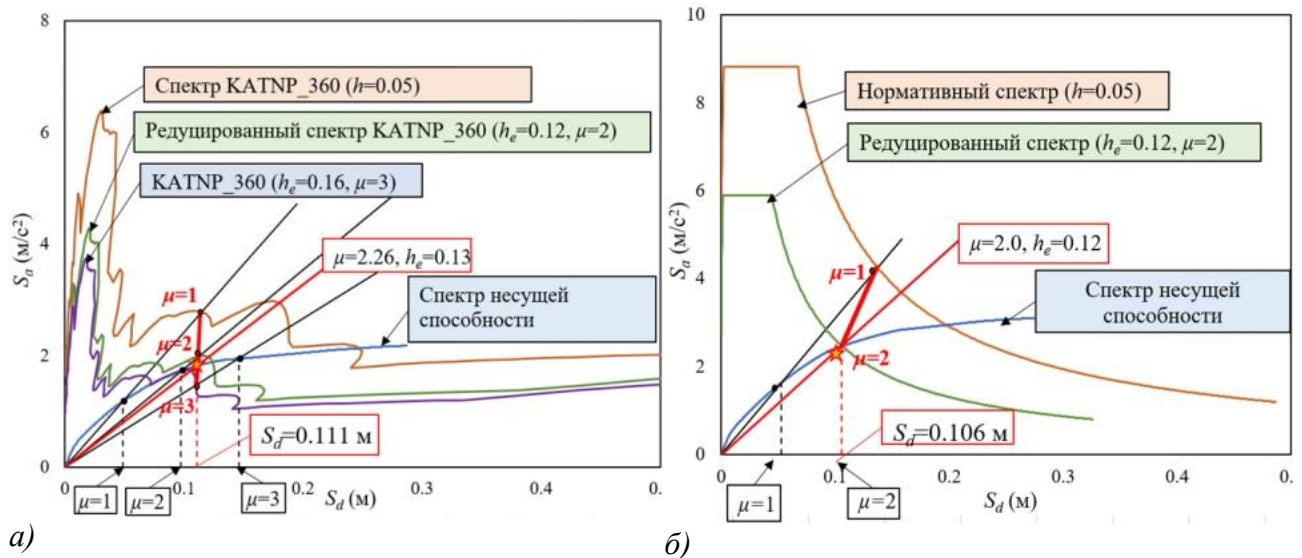


Рисунок 11 – CSM для спектра KATNP 360: а) модель OLD, б) модель NEW

S_a – спектральное ускорение, S_d – спектральное перемещение,
 μ – коэффициент податливости, h_e – коэффициент эквивалентного демпфирования

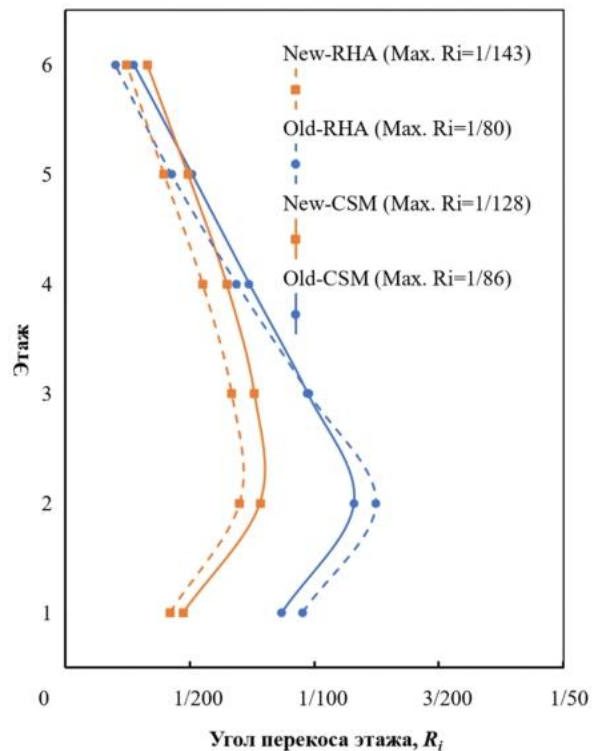


Рисунок 12 – Сравнение откликов CSM и RHA в направлении Y

Индекс повреждаемости

В данном исследовании используется индекс повреждаемости Парка и Энга, предложенный в работе [20], представляющий собой потенциальное повреждение конструкции при землетрясении. Индекс повреждаемости выражается в виде линейной функции максимальной деформации и поглощенной гистеретической энергии и подразделяется на три типа для ж/б конструкций: элементы (балки и колонны), поэтажные, глобальные.

В дополнение к фактической интенсивности записи *KATNP*, индексы повреждаемости были оценены и для более высоких интенсивностей землетрясений для дальнейшего изучения потенциальной повреждаемости объектов исследования. Записи землетрясений масштабируются до целевого значения упругого спектрального ускорения нормативного спектра на основном периоде колебаний здания T_1 , как показано на рисунке 13. На основе этой процедуры был получен максимальный коэффициент масштабирования 2,2. Это среднее значение коэффициентов масштабирования, полученных для моделей *NEW* и *OLD*. Повреждения двух моделей при одинаковой интенсивности землетрясения сравнивались путем усреднения масштабных коэффициентов моделей. Однако в периоды времени после отклика, период колебаний T_R зданий при землетрясении с масштабом 2,2 наблюдается значительный разрыв в ускорениях отклика для записи землетрясения и спектра ускорений, заданного нормами, что требует более оптимального масштабирования записи землетрясения. В данной работе оптимальный коэффициент масштабирования для *KATNP* рассчитывается путем деления среднего значения максимальных глобальных индексов повреждаемости при сгенерированных записях на среднее значение максимальных глобальных индексов повреждаемости при немасштабированном *KATNP*. Оптимальный масштабный коэффициент, полученный таким образом, составляет 1,5. Для более полного анализа индекса повреждаемости, дополнительно также использовался произвольный масштабный фактор 1,8.

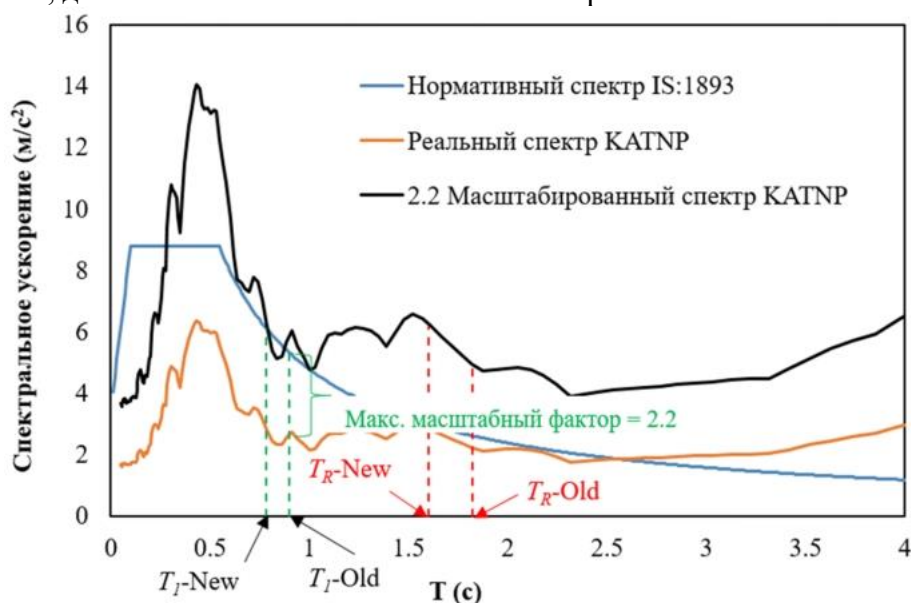


Рисунок 13 – Масштабирование записи *KATNP* до целевого значения нормативного спектра

Модель индекса повреждаемости Парка и Энга для представления конструктивных повреждений ж/б элементов, таких как балки и колонны, описывается уравнением (1). Уравнение выражается через зависимость силы от деформации и параметрами элементов (см. рисунок 14).

$$D_i = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \beta \frac{E_h}{Q_y \delta_u} = \frac{\mu_m}{\mu_u} + \beta \frac{E_h}{Q_y \delta_u}, \quad (1)$$

где $\delta_m = \mu_m \delta_y$ – максимальная деформация при землетрясении;
 $\delta_u = \mu_u \delta_y$ – предельная деформация при монотонном нагружении;
 μ_m – максимальный коэффициент пластичности при землетрясении;
 μ_u – коэффициент предельной пластичности при монотонном нагружении (обычно принимается равным 80% от максимальной прочности);
 δ_y – деформация текучести;
 Q_y – предел текучести;
 β – параметр, связанный с кумулятивным эффектом нагружения;
 $E_h = \int dE$ – диссипированная гистеретическая энергия.

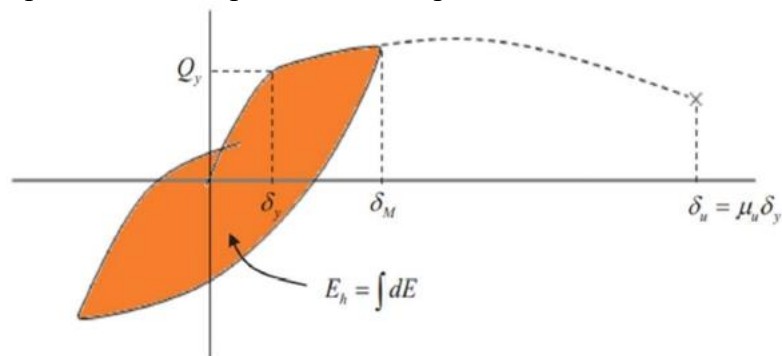


Рисунок 14 – К определению индекса повреждаемости Парка и Энга

Парк и Энг также классифицировали и соотнесли физические конструктивные повреждения с индексом повреждаемости на уровне этажа, как показано в таблице 5. Индексы повреждаемости на уровне этажа или всего сооружения получаются путем комбинации (средневзвешенного значения) индексов отдельных элементов.

Таблица 5 – Классификация повреждений на уровне этажа [20]

Индекс повреждаемости этажа	Степень повреждений
$0 < D_{story} \leq 0.4$	Устранимые повреждения
$0.4 < D_{story} < 1.0$	Повреждения, не подлежащие восстановлению
$D_{story} \geq 1.0$	Полное обрушение

Для каждого случая, при различных интенсивностях землетрясений, взвешенные максимальные индексы повреждаемости на уровне этажа оцениваются по данным *RHA*. *RHA* выполняется в направлениях *X* и *Y* для обоих зданий. На рисунке 15 показано сравнение повреждений на уровне этажа для объектов исследования.

Из рисунка видно, что при записи 2.2*KATNP* первый этаж модели *NEW* получит повреждения, не подлежащие восстановлению, с индексом повреждения этажа 0,497, в то время как модель *OLD* с индексом повреждения этажа 1,053 – разрушится. Для оптимального случая при ускорении грунта 1.5*KATNP* понятно, что повреждения первого этажа модели *NEW* с индексом повреждаемости 0,138 будут находиться в уровне устранимых повреждений, в то

время как повреждения первого этажа модели *OLD* с индексом 0,472 будут находиться в уровне не подлежащих восстановлению.

Также важно отметить, что для всех оцененных индексов повреждаемости верхний этаж модели *NEW* имеет более высокие индексы по сравнению с моделями *OLD*. Это указывает на более равномерное распределение повреждений по этажам, в то время как в модели *OLD* повреждения концентрируются в основном на первом этаже.

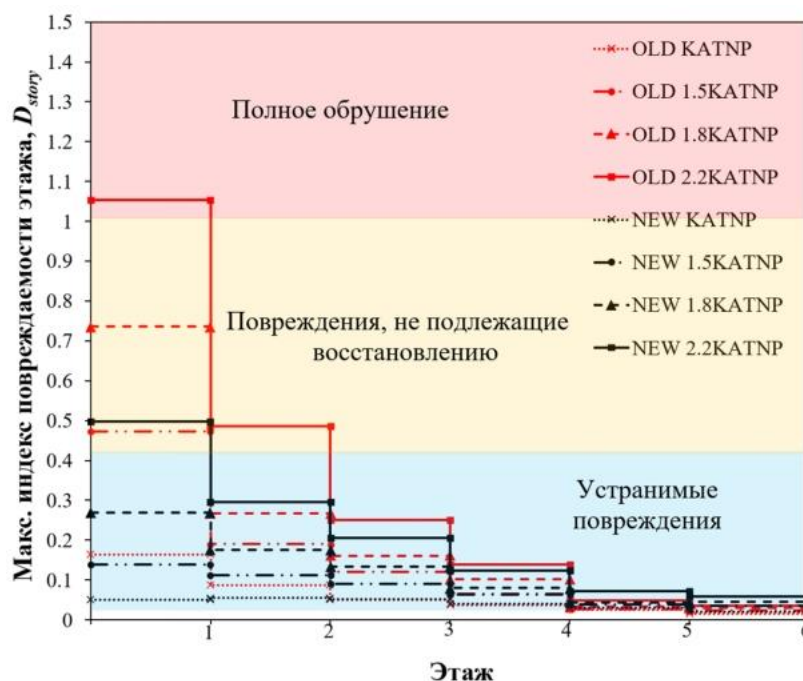


Рисунок 15 – Поэтажный индекс повреждаемости моделей *OLD* и *NEW* для записи *KATNP*

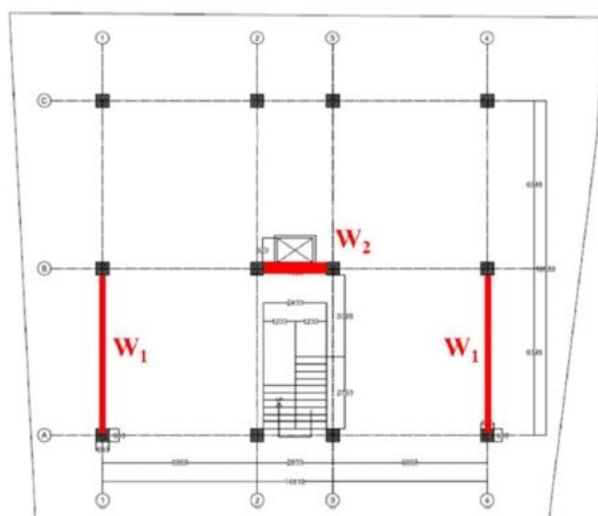
Усиление модели *OLD*

Повреждения зданий, соответствующие всем трем уровням повреждений масштабированной записи 2.2*KATNP*, показывают, что модель *OLD* будет иметь повреждения, соответствующие уровню обрушений. Хотя нормы проектирования и допускают определенную степень повреждений, необходимо предотвратить полное разрушение здания даже при интенсивности воздействия 2.2*KATNP*. Поэтому для предотвращения обрушения модели *OLD* предлагается ее сейсмоусиление с помощью устройства железобетонных стен [21,22].

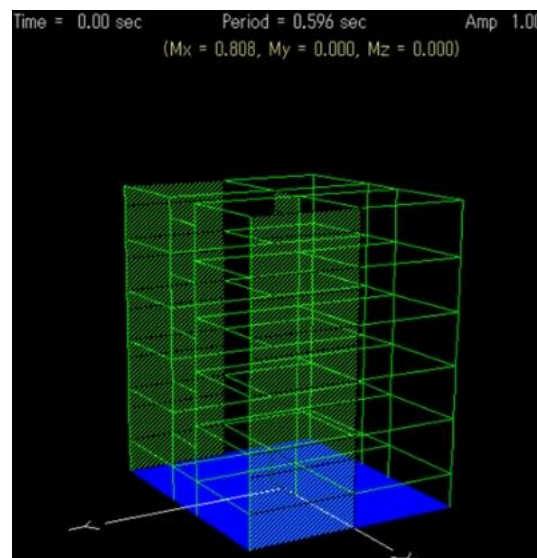
По всей высоте здания вводятся две стены в направлении *Y* и одна в направлении *X* (см. рисунок 16). Стены спроектированы в соответствии с нормами IS 13920:2016, а для учета проемов применяется коэффициент снижения прочности согласно японским рекомендациям [23]. Расчетные сечения и свойства стен приведены в таблице 6. Дополнительный вес от устройства стен составляет 650 кН. Усиленная модель *OLD* далее называется «*RETROFITTED*», как показано на рисунке 16. Период колебаний основного тона составляет 0,596 с в направлении *X*.

Таблица 6 – Параметры стен усиления

Стена	Толщина (м)	% армирования	Слой армирования	Размер проема (м)	Понижающий коэффициент, γ	Прочность арматуры (МПа)	Прочность бетона (МПа)
W_1	0.15	0.25	Один	2.0×1.40	0.62	500	25
W_2	0.25	1.60	Два	Нет	1	500	25



а)



б)

Рисунок 16 – Модель RETROFITTED: а) расположение стен, б) модель здания

RHA в направлении Y для модели RETROFITTED демонстрирует улучшенные характеристики, ограничивая отклик в пределах $1/200$ перекоса этажа (см. рисунок 17).

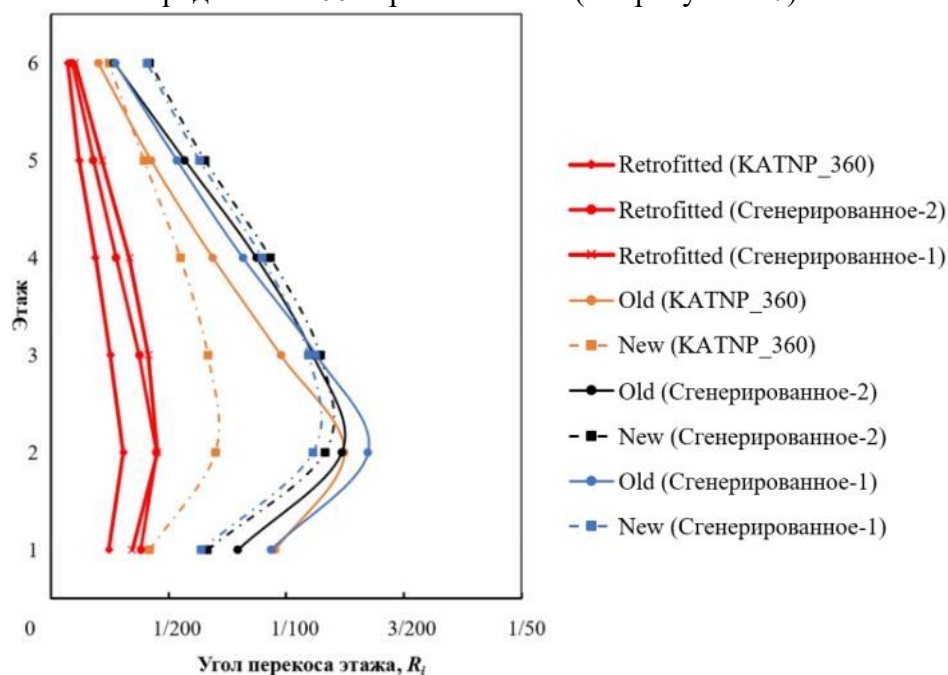


Рисунок 17 – Результаты RHA в направлении Y для модели RETROFITTED

Результаты расчета показывают, что балки усиленного здания получают умеренные повреждения, представленные максимальным индексом повреждаемости 0,263, даже при максимальном масштабе землетрясения (2.2KATNP). В этом же случае колонны с максимальным индексом повреждаемости элемента 0,162 будут иметь незначительные повреждения. Максимальные индексы повреждений на уровне этажей показывают, что модель RETROFITTED будет иметь устранимые повреждения на всех этажах (см. рисунок 18).

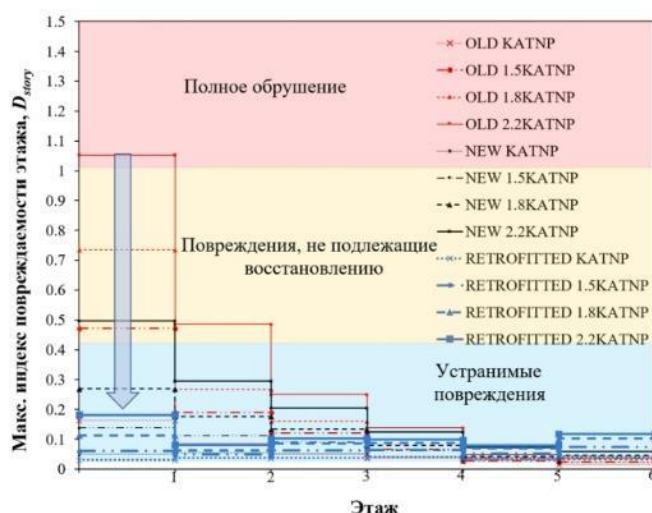


Рисунок 18 – Поэтажный индекс повреждаемости всех моделей

Выводы

Была проведена оценка сейсмостойкости различных конструктивных решений типового 5-этажного жилого железобетонного здания, спроектированного на основе новых и старых индийских норм в г. Тхимпху, Бутан. Чтобы оценить разницу сейсмического отклика моделей, был проведен нелинейный анализ истории отклика для трех записей землетрясений, а также оценка методом спектра несущей способности. Повреждения моделей оцениваются с помощью индексов повреждаемости при масштабированных записях реального землетрясения.

На основании результатов оценки сейсмостойкости сделаны следующие выводы:

1. Несмотря на то, что несущая способность объектов исследования значительно превышает проектные значения, сдвигающая сила, вызванная землетрясением, достаточно велика, чтобы вызвать повреждения обеих моделей.
2. Для модели *OLD* максимальный отклик был получен при Сгенерированной-1 записи движения грунта с углом перекоса этажа 1/74, а для модели *NEW* максимальный отклик был получен при Сгенерированной-2 записи движения грунта с углом перекоса этажа 1/86. Отклики показали, что здание, спроектированное по новым индийским нормам, показало себя лучше.
3. Несмотря на то, что максимальные отклики были получены при сгенерированных записях землетрясений, явное различие в откликах объектов исследований наблюдалось только при расчете на реальное землетрясение *KATNP*.
4. Результаты применения метода спектра несущей способности (*CSM*) для нормативного спектра показали, что проектирование с использованием новых норм улучшило отклик с максимального угла перекоса этажа с 1/78 до 1/98. *CSM* оказался выгодным благодаря своей меньшей сложности и эффективности. *CSM* также обеспечил хорошую сходимость результатов с анализом истории отклика при расчете на реальное землетрясение *KATNP*.
5. Результаты индексов повреждаемости при максимальном масштабированном воздействии реального землетрясения указывают на концентрированное повреждение первого этажа, соответствующее уровню обрушения для модели *OLD*, в то время как для модели *NEW* обрушение предотвращается за счет более равномерного распределения повреждений по этажам.
6. Для предотвращения обрушения здания, спроектированного по старым нормам, модель *OLD* была усилена железобетонными стенами. Анализ отклика во времени в направлении *Y* модели *RETROFITTED* показал, что после установки стен реакция может быть ограничена в пределах 1/200 предельного перекоса этажа для всех записей землетрясений. Аналогично,

индексы повреждаемости показали, что усиленное здание получит умеренные или незначительные повреждения и может быть восстановлено даже после рассматриваемого землетрясения максимального масштаба.

В целом, данное комплексное исследование способствовало углублению понимания методологии оценки сейсмостойкости железобетонных зданий, спроектированных в соответствии со старыми и новыми нормами, однако очевидно, что для эффективного внедрения нелинейных методов анализа в отечественную практику необходима серьезная модернизация существующих нормативных документов, включая разработку рекомендаций и критериев оценки сейсмостойкости для зданий различных конструктивных систем (рамных, рамно-связевых, стеновых, крупнопанельных), аналогичных рассмотренным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Le Roux-Mallouf R. et al. A 2600-year-long paleoseismic record for the Himalayan Main Frontal Thrust (western Bhutan) // *Solid Earth*. Copernicus Publications, 2020. Vol. 11, № 6. P. 2359–2375.
2. Debnath R., Halder L. A Comparative Study of the Seismic Provisions of Indian Seismic Code IS 1893-2002 and Draft Indian Code IS 1893:2016 // *Recent Advances in Structural Engineering*, Volume 2 / ed. Rao A.R.M., Ramanjaneyulu K. Singapore: Springer Singapore, 2019. Vol. 12. P. 151–160.
3. Абаев З. К. Определение сейсмических сил в зданиях со стенами из природного камня в Федеративной Демократической Республике Непал, Российской Федерации и Республике Таджикистан / З. К. Абаев, М. Шилдкамп, А. Д. Валиев // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2022. № 6. С. 18–45.
4. Aschheim M., Hernández-Montes E., Vamvatsikos D. Design of Reinforced Concrete Buildings for Seismic Performance: Practical Deterministic and Probabilistic Approaches. Taylor & Francis, 2016. 400 p.
5. Аветисян Л.А., Скорняков Т.С. Оценка сейсмостойкости многоэтажного каркасного здания по Российским и Европейским нормативным документам // *Строительство и реконструкция*. 2018. № 1. С. 80–87.
6. Бедов А.И., Николенко И.И. Обеспечение эксплуатационных характеристик железобетонных элементов каркасов зданий, подвергшихся сейсмическим воздействиям // *Строительство и реконструкция*. 2021. № 1. С. 3–15.
7. Aggarwal Y., Kulariya M., Saha S.K. Seismic performance evaluation of reinforced concrete hilly buildings under sequence of earthquakes // *Structural Design Tall Build*. 2024. Vol. 33, № 6. P. e2086.
8. Shegay A.V. et al. Evaluation of seismic residual capacity ratio for reinforced concrete structures // *Resilient Cities and Structures*. 2023. Vol. 2, № 1. P. 28–45.
9. Fajfar P. A Practical Nonlinear Method for Seismic Performance Evaluation // *Advanced Technology in Structural Engineering*. Philadelphia, Pennsylvania, United States: American Society of Civil Engineers, 2000. P. 1–8.
10. Абаев З. К. Оценка сейсмостойкости многоэтажного жилого здания с фрикционно-маятниковыми опорами на примере Индонезии / З. К. Абаев, Ф. Султан // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2024. Т. 20. № 1. С. 57–72.
11. Baek H.-J. et al. Seismic Performance Evaluation of Reinforced Concrete Buildings Retrofitted with a New Concrete Filled Tube Composite Strengthening System // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, № 24. P. 13231.
12. Naeem A., Koichi K., Lee J. Seismic Performance Evaluation of Reinforced Concrete Building Structure Retrofitted with Self-Centering Disc-Slit Damper and Conventional Steel Slit Damper // *Buildings*. 2024. Vol. 14, № 3. P. 795.
13. Harrington C.C., Liel A.B. Indicators of improvements in seismic performance possible through retrofit of reinforced concrete frame buildings // *Earthquake Spectra*. 2021. Vol. 37, № 1. P. 262–283.
14. Абаев З. К. Разработка рекомендаций по реализации политики снижения сейсмического риска в Российской Федерации на основе мирового опыта / З. К. Абаев, А. Д. Валиев, М. Ю. Кодзаев // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 3. С. 48–72.
15. Manfredi V. et al. Selection and spectral matching of recorded ground motions for seismic fragility analyses // *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2022. Vol. 20, № 10. P. 4961–4987.
16. Center for Engineering Strong Motion Data USGS. Режим доступа: <https://www.strongmotioncenter.org> (дата обращения: 14.05.2024).
17. Earthquake Disaster Engineering Research Laboratory. Software STERA 3D. Режим доступа: <https://rc.ace.tut.ac.jp/saito/software-e.html> (дата обращения: 14.05.2024).
18. Kitamura H., Miyauchi Y., Uramoto H. Study on Standards for Judging Structural Performances in Seismic Performance Based Design: Evaluation of the safety limit value and margin I and II levels in JSCA seismic performance menu // *Transactions of AIJ*. 2006. Vol. 71, № 604. P. 183–191.

19. Freeman S.A. The capacity spectrum method as a tool for seismic design // Proceedings of the 11th European conference on earthquake engineering. Citeseer, 1998. P. 6–11.
20. Park Y., Ang A.H. -S. Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete // Journal of Structural Engineering. 1985. Vol. 111, № 4. P. 722–739.
21. Pradhan S., Li Y., Sanada Y. Seismic performance evaluation and risk assessment of typical reinforced concrete frame buildings with masonry infill and conventional vertical extension in Nepal // Bulletin of Earthquake Engineering. 2022. Vol. 20, № 2. P. 853–884.
22. Zhao J. et al. Seismic performance evaluation of different strategies for retrofitting RC frame buildings // Structures. 2021. Vol. 34. P. 2355–2366.
23. Nakano Y. et al. Guideline for post-earthquake damage evaluation and rehabilitation of RC buildings in Japan // 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver BC, Canada, 2004. Vol. 1, № 1. P. 124.

REFERENCES

1. Le Roux-Mallouf R. et al. A 2600-year-long paleoseismic record for the Himalayan Main Frontal Thrust (western Bhutan). *Solid Earth*. Copernicus Publications, 2020. Vol. 11, № 6. P. 2359–2375. <https://doi.org/10.5194/se-11-2359-2020>
2. Debnath R., Halder L. A Comparative Study of the Seismic Provisions of Indian Seismic Code IS 1893-2002 and Draft Indian Code IS 1893:2016. *Recent Advances in Structural Engineering*. Volume 2 / ed. Rao A.R.M., Ramanjaneyulu K. Singapore: Springer Singapore, 2019. Vol. 12. P. 151–160. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0365-4_13
3. Abaev Z.K., Schildkamp M., Valiev A.D. Base shear seismic demand comparison for buildings with natural stone walls in Nepal, Russia and Tajikistan. *Earthquake Engineering. Construction Safety*. 2022. № 6. P. 18-45. (In Russ.) <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-6-18-45>
4. Aschheim M., Hernández-Montes E., Vamvatsikos D. Design of Reinforced Concrete Buildings for Seismic Performance: Practical Deterministic and Probabilistic Approaches. Taylor & Francis, 2016. 400 p.
5. Avetisyan L.A., Skorniyakov T.S. Estimation of seismic resistance of multi-storey frame building according to Russian and European normative documents. *Building and Reconstruction*. 2018. № 1. P. 80-87. (In Russ.)
6. Bedov A.I., Nikolenko I.I. Provision of operational characteristics of reinforced concrete elements of frames of buildings subjected to seismic effects. *Building and Reconstruction*. 2021. № 1. P. 3-15. (In Russ.) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-93-1-3-15>
7. Aggarwal Y., Kulariya M., Saha S.K. Seismic performance evaluation of reinforced concrete hilly buildings under sequence of earthquakes. *Structural Design Tall Build*. 2024. Vol. 33, № 6. P. e2086. <https://doi.org/10.1002/tal.2086>
8. Shegay A.V. et al. Evaluation of seismic residual capacity ratio for reinforced concrete structures. *Resilient Cities and Structures*. 2023. Vol. 2, № 1. P. 28–45. <https://doi.org/10.1016/j.rcns.2023.02.004>
9. Fajfar P. A Practical Nonlinear Method for Seismic Performance Evaluation. *Advanced Technology in Structural Engineering*. Philadelphia, Pennsylvania, United States: American Society of Civil Engineers, 2000. P. 1–8. [https://doi.org/10.1061/40492\(2000\)125](https://doi.org/10.1061/40492(2000)125)
10. Abaev Z.K., Sulthan F. Seismic Performance Evaluation of Multi-Storey Residential Building with Friction Pendulum Bearings: Indonesia case study. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024. Vol. 20. № 1. P. 57–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-1-57-72>
11. Baek H.-J. et al. Seismic Performance Evaluation of Reinforced Concrete Buildings Retrofitted with a New Concrete Filled Tube Composite Strengthening System. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, № 24. P. 13231. <https://doi.org/10.3390/app132413231>
12. Naeem A., Koichi K., Lee J. Seismic Performance Evaluation of Reinforced Concrete Building Structure Retrofitted with Self-Centering Disc-Slit Damper and Conventional Steel Slit Damper. *Buildings*. 2024. Vol. 14, № 3. P. 795. <https://doi.org/10.3390/buildings14030795>
13. Harrington C.C., Liel A.B. Indicators of improvements in seismic performance possible through retrofit of reinforced concrete frame buildings. *Earthquake Spectra*. 2021. Vol. 37, № 1. P. 262–283. <https://doi.org/10.1177/8755293020936707>
14. Abaev Z., Valiev A., Kodzaev M. Development of recommendations for the implementation of seismic risk mitigation policy in the Russian Federation based on world experience. *Earthquake Engineering Construction Safety*. 2023. № 3. P. 48–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-48-72>
15. Manfredi V. et al. Selection and spectral matching of recorded ground motions for seismic fragility analyses. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2022. Vol. 20, № 10. P. 4961–4987. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01393-0>
16. Center for Engineering Strong Motion Data USGS. Available from: <https://www.strongmotioncenter.org> (Accessed: 14.05.2024).
17. Earthquake Disaster Engineering Research Laboratory. Software STERA 3D. Available from: <https://rc.ace.tut.ac.jp/saito/software-e.html> (Accessed: 14.05.2024).
18. Kitamura H., Miyauchi Y., Uramoto H. Study on Standards for Judging Structural Performances in Seismic Performance Based Design: Evaluation of the safety limit value and margin I and II levels in JSCA seismic performance menu. *Transactions of AIJ*. 2006. Vol. 71, № 604. P. 183–191. https://doi.org/10.3130/aijs.71.183_1

19. Freeman S.A. The capacity spectrum method as a tool for seismic design. *Proceedings of the 11th European conference on earthquake engineering*. Citeseer, 1998. P. 6–11.
20. Park Y., Ang A.H. -S. Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete. *Journal of Structural Engineering*. 1985. Vol. 111, № 4. P. 722–739. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111:4\(722\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:4(722))
21. Pradhan S., Li Y., Sanada Y. Seismic performance evaluation and risk assessment of typical reinforced concrete frame buildings with masonry infill and conventional vertical extension in Nepal. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2022. Vol. 20, № 2. P. 853–884. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01246-2>
22. Zhao J. et al. Seismic performance evaluation of different strategies for retrofitting RC frame buildings. *Structures*. 2021. Vol. 34. P. 2355–2366. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.09.016>
23. Nakano Y. et al. Guideline for post-earthquake damage evaluation and rehabilitation of RC buildings in Japan. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver BC, Canada, 2004. Vol. 1, № 1. P. 124.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-79-00087).

Авторы выражают благодарность Японско-Российскому центру молодежных обменов (JREX), Японскому агентству международного сотрудничества (JICA) и Международному институту сейсмологии и сейсмостойкого строительства IISEE (г. Цукуба, Япония) за возможность академического и исследовательского сотрудничества.

Acknowledgements

The research was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 24-79-00087).

The authors are grateful to the Japan-Russia Youth Exchange Center (JREX), the Japan International Cooperation Agency (JICA), and the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering IISEE (Tsukuba, Japan) for the opportunity of academic and research cooperation.

Информация об авторах:

Абаев Заурбек Камболатович

ФГБУН «Владикавказский научный центр РАН», г. Владикавказ, Россия, кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник комплексного научно-исследовательского отдела.
E-mail: zaurbek_a@yahoo.com

Денпур Церинг

Министерство инфраструктуры и транспорта, г. Тхимпху, Бутан, исполнительный инженер.
E-mail: tsheringdendup2@gmail.com

Information about authors:

Abaev Zaurbek K.

Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz, Russia, Candidate of Technical Science, Researcher. ORCID ID: 0000-0002-6932-2740.
E-mail: zaurbek_a@yahoo.com

Dendup Tshering

Ministry of Infrastructure and Transport, Thimphu, Bhutan, Executive Engineer.
ORCID ID: 0009-0008-3416-3672.
E-mail: tsheringdendup2@gmail.com

Я.Л. ОБЕРНИХИНА¹, Г.А. СМОЛЯГО¹¹ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)», г. Белгород, Россия

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В НЕРАЗРЕЗНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛКАХ, УСИЛЕННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОМ ПОД НАГРУЗКОЙ

Аннотация. В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований перераспределения изгибающих моментов в двухпролетных неразрезных железобетонных балках, усиленных углепластиком под нагрузкой, а именно, пятнадцати балок пяти серий. Первая серия балок (БМ) – эталонные образцы без усиления. Ко второй серии балок (БМУ) относились образцы, усиленные углепластиком путем приклеивания его к растянутой зоне в пролетах с U-образной анкерровкой на опорных участках без предварительного нагружения. Третья (БМУ В), четвертая (БМУ Г) и пятая (БМУ Д) серии балок – образцы, усиленные углепластиком при 30%, 50% и 70% от предполагаемой разрушающей нагрузки эталонных образцов, аналогично второй серии балок. Для раскрытия статической неопределенности в начале и конце каждого этапа экспериментального исследования снимались показания опорных динамометров. На основании полученных данных были построены средние по каждой серии опытные эпюры изгибающих моментов. Кроме того, в результате исследования было выявлено, что усиление углепластиком оказывает влияние на характер перераспределения изгибающих моментов в неразрезных балках, изменяя соотношения опорного $M_{оп}$ и пролетных $M_{пр}$ моментов. Таким образом, с помощью использования системы внешнего армирования на основе полимеркомпозиционных материалов можно скорректировать при необходимости характер перераспределения изгибающих моментов в неразрезных балках. В частности, выполнив усиление пролетных зон, можно разгрузить опору.

Ключевые слова: неразрезная железобетонная балка, перераспределение усилий, усиление под нагрузкой, система внешнего армирования, углепластик

Y. L. OBERNIKHINA¹, G. A. SMOLYAGO¹¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

REDISTRIBUTION OF FORCES IN CONTINUOUS REINFORCED CONCRETE BEAMS REINFORCED WITH CFRP UNDER LOAD

Abstract. This article presents the results of experimental studies of bending moment redistribution in two-span continuous reinforced concrete beams reinforced with CFRP under load. Namely, fifteen beams of five series. The first series of beams (CB) are reference specimens without reinforcement. The second series of beams (MSB) included specimens reinforced with CFRP by gluing it to the tension zone in spans with U-shaped anchorage in the support sections without preliminary loading. The third (MSB C), fourth (MSB D) and fifth (MSB E) series of beams are specimens reinforced with CFRP at 30%, 50% and 70% of the expected breaking load of the reference specimens, similar to the second series of beams. To reveal static indeterminacy, readings of support dynamometers were taken at the beginning and end of each stage of the experimental study. Based on the data obtained, average experimental bending moment diagrams for each series were constructed. In addition, the study revealed that carbon fiber reinforcement affects the nature of the redistribution of bending moments in continuous beams, changing the ratio of the support M_{su} and span M_{sp} moments. Thus, by using an external reinforcement system based on polymer composite materials, it is possible to adjust, if necessary, the nature of the redistribution of bending moments in continuous beams. In particular, by reinforcing the span zones, it is possible to relieve the support.

Keywords: *continuous reinforced concrete beam, redistribution of forces, reinforcement under load, external reinforcement system, CFRP.*

Введение

В статически неопределимых конструкциях неупругие деформации вызывают перераспределение усилий, т.е. отклонение фактического распределения усилий от упругого – полученного в результате расчета упругой системы [1]. Изучению характера перераспределения моментов в неразрезных железобетонных балках, а также факторов на него влияющих посвящено множество работ [2-9].

Однако исследованию влияния системы внешнего армирования на перераспределение изгибающих моментов в многопролетных балках, особенно в отечественных исследованиях, уделено недостаточно внимания.

Изучению характера перераспределения моментов в неразрезных железобетонных балках, усиленных ламинатами из углепластика, посвящены работы зарубежных авторов [10-18]. В работе [10] представлены результаты экспериментальных исследований пяти неразрезных балок, усиленных полимеркомпозиционными материалами. Первый и третий образцы были усилены в зонах действия максимальных изгибающих моментов, а второй и четвертый образцы дополнительно были усилены еще и в зонах действия максимальных поперечных сил. В качестве материала усиления использовались стеклопластиковые углепластиковые холсты. Пятый образец был эталонным. Каждая балка перед разрушением была поэтапно нагружена и разгружена. В ходе исследования было выявлено, что использование полимеркомпозиционных материалов для усиления неразрезных балок повышает прочность, снижает деформативность, а также способствует изменению характера трещинообразования: после усиления трещины распределены более равномерно, а их ширина раскрытия меньше.

Кроме того, авторами [11] также были проведены экспериментальные исследования влияния на несущую способность усиления углепластиком сжатой зоны неразрезных железобетонных балок. Экспериментальные образцы были разделены на 2 серии (I и II), по 5 полноразмерных образцов в серии. Балки серии I были спроектированы таким образом, чтобы разрушение произошло по наклонным сечениям; а балки серии II – по нормальным сечениям. В ходе испытаний было выявлено, что образцы серии I разрушились в результате образования наклонных трещин, образовавшихся в следствие совместного действия нормальных и касательных напряжений, что, в свою очередь привело к отслоению углепластика. Разрушение балок серии II наступило в результате разрушения в бетоне непосредственно у склеиваемой поверхности. Разрушение образцов носило пластический характер. В результате усиления углепластиком, несущая способность балок серии I увеличилась на 29%, а балок серии II - на 40% в сравнении с эталонными образцами.

Автором [15] были проведены экспериментальные исследования НДС неразрезных железобетонных балок, усиленных углепластиком как в зонах положительных, так и в зонах отрицательных моментов. Разрушение усиленных балок произошло в результате разрыва слоев углепластика с раздроблением контактного слоя бетона. Кроме того, было замечено, что после того, как армирование было выполнено в растянутых и сжатых зонах, наблюдалось перераспределение изгибающих моментов, в том числе и благодаря усилению сжатой зоны, а несущая способность образцов увеличилась примерно на 20%.

В работе [17] проведено экспериментальное исследование НДС и перераспределения изгибающих моментов неразрезных железобетонных балок (RHSC), усиленных полимеркомпозитными материалами на основе стекла- (GFRP) и углепластика (CFRP). Опытные образцы разделены на следующие группы: СВ эталонный образец; SCI, SC2 и SC3 - балки, усиленные углепластиком в 1, 2 и 3 слоя соответственно (в пролете и на промежуточной

опоре); SG3 балка, усиленная стекловолокном в 3 слоя (в пролете и на промежуточной опоре). В ходе экспериментального исследования было выявлено, что при увеличении количества слоев композитного материала увеличивается несущая способность балки, в то время как деформативность углепластика, перераспределение изгибающих моментов и жесткость образца уменьшаются.

Однако, несмотря на накопленный мировой опыт экспериментальных исследований статически неопределимых изгибаемых железобетонных элементов, усиленных углепластиком, изучению влияния системы внешнего армирования на изменение характера перераспределения усилий посвящено достаточно мало работ.

Модели и методы

Для исследования характера перераспределения изгибающих моментов в неразрезных железобетонных балках, усиленных углепластиком под нагрузкой, были проведены экспериментальные исследования опытных образцов – 15-ти двухпролетных балок пяти серий. Первая серия балок (БМ) - эталонные образцы без усиления. Ко второй серии балок (БМУ) относятся образцы, усиленные углепластиком путем приклеивания его к растянутой зоне в пролетах с U-образной анкерровкой на приопорных участках без предварительного нагружения. Третья (БМУ В), четвертая (БМУ Г) и пятая (БМУ Д) серии балок – образцы, усиленные углепластиком при 30% (12кН), 50% (20кН) и 70% (28кН) от предполагаемой разрушающей нагрузки эталонных образцов, аналогично второй серии балок. Конструкция опытных образцов и схема их армирования представлены на рисунках 1 и 2 соответственно.

Для армирования опытных образцов двухпролетных балок использовались плоские сварные каркасы. В качестве рабочей и конструктивной арматуры каркасов принята стальная горячекатаная арматура класса А500 Ø8 мм. В качестве поперечной арматуры используется холоднокатаная проволока из низкоуглеродистой стали класса Вр500 Ø5 мм. Балки изготавливались из бетона класса по прочности на сжатие В30.

В качестве материала усиления была использована система внешнего армирования, состоящая из однонаправленного углеродного холста на основе высокопрочного углеродного волокна со стеклянной уточной тканью марки FibARM 530/300 с прочностью на растяжение 4200 МПа и модулем упругости 240 000 МПа и адгезива - клея на основе эпоксидной смолы FibArm Resin 530+.

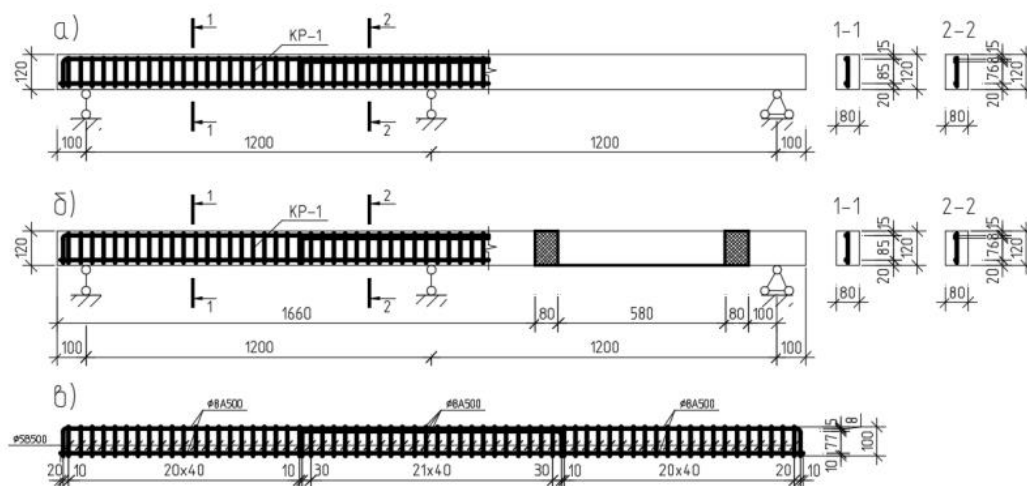


Рисунок 1 – Схема армирования опытных образцов: а) эталонный образец - серия БМ; б) усиленный образец - серии БМУ Б; БМУ В; БМУ Г; БМУ Д; в) каркас КР-1.

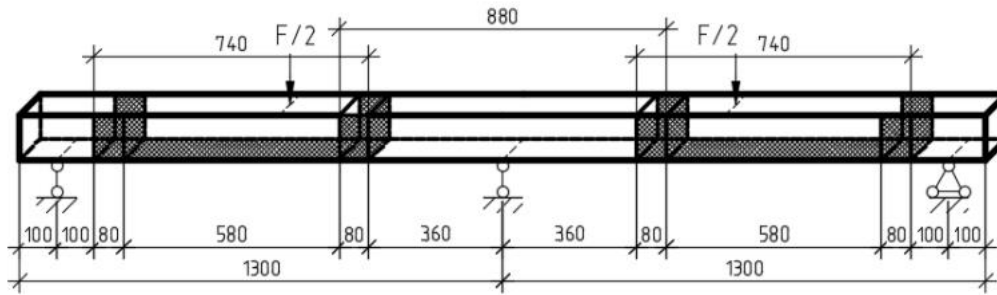


Рисунок 2 – Схема усиления опытных образцов

Фиксация величины опорных реакций осуществлялась с помощью трех динамометров ДОСМ 3-5, расположенных под каждой опорой.

В рамках экспериментального исследования эталонные балки серии «БМ» нагружались поэтапно вплоть до разрушения.

Балки серии «БМУ», усиливали углеродным волокном без предварительного нагружения по описанной ранее схеме. Затем нагружали поэтапно вплоть до разрушения.

Балки серий «БМУ В», «БМУ Г» и «БМУ Д» усиливали углепластиком под нагрузкой, составляющей 30% (12кН), 50% (20кН) и 70% (28кН) соответственно от предполагаемой разрушающей нагрузки эталонных балок, и нагружали поэтапно вплоть до разрушения.

Выполнение работ по усилению углепластиком выполнялось в соответствии с требованиями существующих норм.

Общий вид испытания неразрезных железобетонных балок до и после усиления приведен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Общий вид испытания до усиления углепластиком и после усиления

Результаты исследования и их анализ

Для раскрытия статической неопределенности в начале и конце каждого этапа экспериментального исследования снимались показания опорных динамометров, установленных на опорах. На основании полученных данных были построены средние по каждой серии опытные эпюры изгибающих моментов на каждом этапе нагружения (рисунок 4). Также в таблице 1 приведены данные о характере перераспределения усилий – соотношения опорного и пролетного моментов балок на некоторых характерных этапах нагружения.

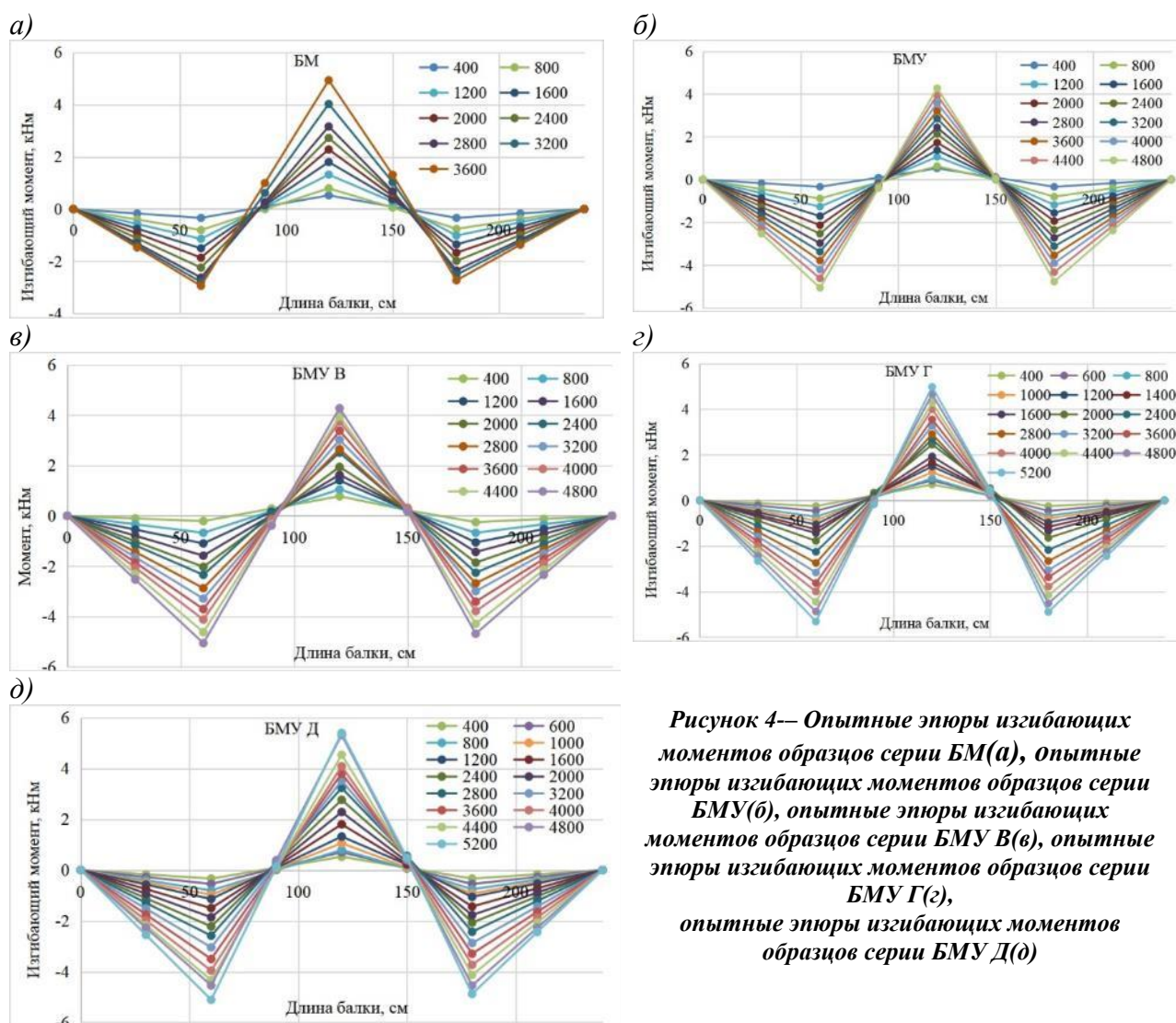


Рисунок 4— Опытные эпюры изгибающих моментов образцов серии БМ(а), опытные эпюры изгибающих моментов образцов серии БМУ(б), опытные эпюры изгибающих моментов образцов серии БМУ В(в), опытные эпюры изгибающих моментов образцов серии БМУ Г(г), опытные эпюры изгибающих моментов образцов серии БМУ Д(д)

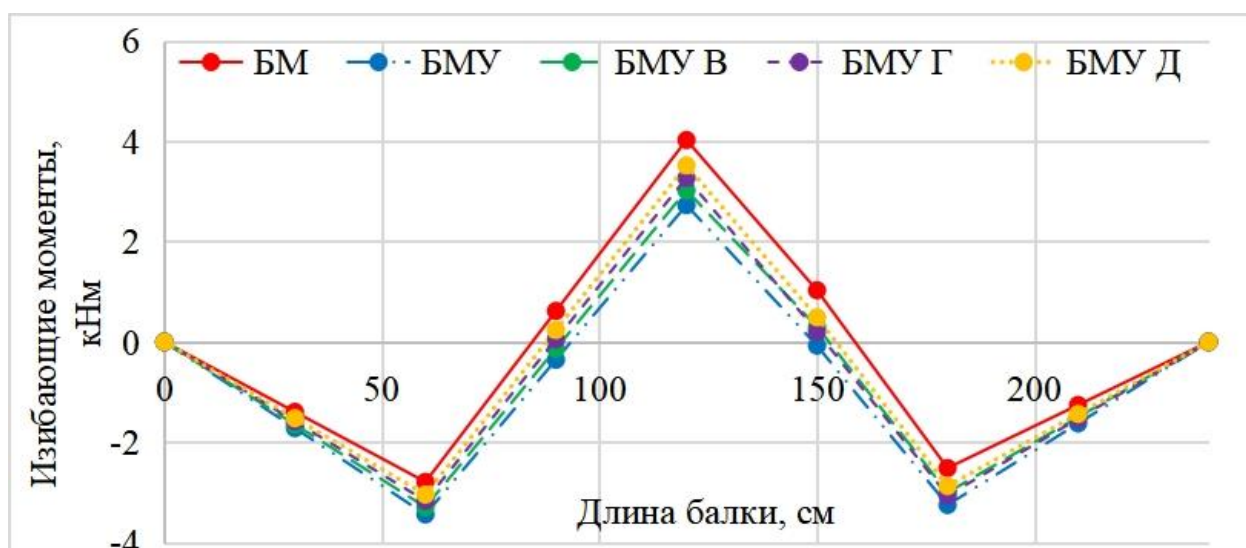


Рисунок 5 – Опытные эпюры изгибающих моментов образцов серий БМ, БМУ, БМУ В, БМУ Г и БМУ Д при заданной нагрузке (32 кН)

Таблица 1 – Опытные значения изгибающих моментов при заданной нагрузке (14 кН; 24 кН; 32 кН; 34 кН) в экспериментальных балках

Серия балок	Среднее опытное значение моментов, кНм				Соотношение моментов
	В пролете $\bar{M}_{пр}^{exp}$	На опоре $\bar{M}_{оп}^{exp}$	$\frac{\bar{M}_{пр}^{exp}}{\bar{M}_{пр. БМ}^{exp}}, \%$	$\frac{\bar{M}_{оп, i}^{exp}}{\bar{M}_{оп. БМ}^{exp}}, \%$	$\frac{\bar{M}_{оп}^{exp}}{\bar{M}_{пр}^{exp}}$
14кН					
БМ	1,23	-1,66	100	100	1,35
БМУ	1,45	-1,20	117,9	72,3	0,83
БМУ В	1,27	-1,39	103,3	83,7	1,09
БМУ Г	—	—	—	—	—
БМУ Д	—	—	—	—	—
24кН					
БМ	2,11	-2,72	100	100	1,29
БМУ	2,48	-2,09	117,5	76,8	0,84
БМУ В	2,31	-2,32	109,5	85,3	1,0
БМУ Г	2,17	2,65	102,8	97,4	1,22
БМУ Д	—	—	—	—	—
32кН					
БМ	2,65	-4,02	100	100	1,52
БМУ	3,30	-2,79	124,5	69,4	0,85
БМУ В	3,15	-2,91	118,9	72,4	0,92
БМУ Г	3,06	-3,25	115,5	80,5	1,06
БМУ Д	2,96	-3,52	111,7	87,6	1,19
34кН					
БМ	2,71	-4,32	100	100	1,59
БМУ	3,26	-3,47	120,3	80,3	1,06
БМУ В	3,28	-3,38	121,0	78,2	1,03
БМУ Г	3,06	-3,37	119,2	78,0	1,04
БМУ Д	3,10	-3,61	114,4	83,6	1,16

Выводы

Усиление углепластиком оказывает влияние на характер перераспределения изгибающих моментов, изменяя соотношения опорного $M_{оп}$ и пролетных $M_{пр}$ моментов. Так, на одном из этапов нагружения соотношение опорного и пролетного моментов эталонных образцов (БМ) составляет 1,59, а усиленных образцов серий БМУ, БМУ В, БМУ Г, БМУ Д – 1,06; 1,03; 1,04; 1,16 соответственно.

Таким образом, используя систему внешнего армирования на основе полимеркомпозиционных материалов можно скорректировать при необходимости характер перераспределения изгибающих моментов в неразрезных балках. В частности, выполнив усиление пролетных зон, можно разгрузить опорную, и что достаточно важно, в случае необходимости усиления, т.к. зачастую, это связано с демонтажем пола, а в ряде случаев и оборудования, а также и остановки технологического процесса на предприятии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крылов С.М., Гуца Ю.П., Абаканов М.С. Прочность статически неопределимых балок, армированных стальными без площадки текучести // Сборник НИИЖБ: Прочность, жесткость и трещиностойкость железобетонных конструкций. 1979. С. 40-41.
2. Смоляго Г.А., Жданов А.Е., Дрокин С.В., Дронов А.В. Расчет многопролетных железобетонных балок по методу заданных деформаций // Промышленное и гражданское строительство. 2014. №12. С. 59-61.

3. Тамразян А.Г., Сайед Й.А.К. Экспериментальное исследование коэффициента перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках // Строительство и реконструкция. 2023. № 5. С. 24–35. [doi.org:10.33979/2073-7416-2023-109-5-24-35](https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-109-5-24-35)
4. Сайед Й.А.К. Исследование перераспределения моментов в статически неопределимых корродированных железобетонных балках // Инженерный вестник Дона. 2024. № 1.
5. Гиль А.И., Лазовский Е.Д. Анализ результатов экспериментальных исследований неразрезных железобетонных балок с комбинированным армированием композитной и стальной арматурой растянутой зоны над промежуточной опорой // Вестник БрГТУ. 2023. №2(131). С. 3-8. [doi.org:10.36773/1818-1112-2023-131-2-3-8](https://doi.org/10.36773/1818-1112-2023-131-2-3-8)
6. Маилин Л.Р. Перераспределение усилий в статически неопределённых железобетонных балках // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. 1983. № 4. С. 6.
7. Никулин А.И., Сотников Д.Ю., Казаков Д.В. Перераспределение усилий в статических расчётах неразрезных железобетонных балок // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. 2008. № 17. С. 34-37.
8. Смоляго Г.А., Обернихина Я.Л., Обернихин Д.В. Влияние внешнего армирования углепластиком на перераспределение усилий в неразрезных железобетонных балках // Архитектура. Строительство. Информационные технологии - 2023 (АСИТ-2023). 2023. С. 33-34.
9. Попов Д.С. Численные исследования перераспределений усилий в статически неопределимых коррозионно-повреждённых железобетонных балках // Инженерный вестник Дона. 2023. № 4 (100). С. 591-610.
10. Grace N.F., Sayed G.A., Saleh K.R. Strengthening of continuous beams using fibre reinforced polymer laminates // Fourth International Symposium on FRP Reinforcement for RC Structures. ACI. 1999. Pp. 647-657.
11. Grace N.F. Strengthening of negative moment region of RC beams using CFRP Strips // ACI Struct. J. 2001. Vol. 98(3). Pp. 347-357.
12. El-Refaie S.A., Ashour A.F., Garrity S.W. Sagging and hogging strengthening of continuous reinforced concrete beams using carbon fibre-reinforced polymer sheets // ACI Struct. J. 2003. Vol.100. Pp. 446-453. doi.org/10.14359/12653
13. El-Refaie S.A., Ashour A.F., Garrity S.W. CFRP strengthened continuous concrete beams // Proceedings of the ICE - Structures and Buildings. 2003. Vol. 156 (4). Pp. 395-404. doi.org/10.1680/stbu.2003.156.4.395
14. Aly H.A., Nasr E.A., El-Ghandour A.A., Abdelrahman A. A. Moment redistribution in RC continuous beams strengthened in flexure by CFRP laminates // FRP Composites in Civil Engineering – CICE. 2004. Pp. 227-235. [doi.org:10.1201/9780203970850.ch22](https://doi.org/10.1201/9780203970850.ch22)
15. Aiello M.A., Valente L., Rizzo A. Moment redistribution in continuous reinforced concrete beams strengthened with carbon-fiber-reinforced polymer laminates // Mech. Compos. Mater. 2007. Vol. 43. Pp. 453-66. doi.org/10.1007/s11029-007-0043-x
16. Maghsoudi A.A., Bengar H. Moment redistribution and ductility of RHSC continuous beams strengthened with CFRP // Turkish J. Eng. Env. Sci. 2009. Vol. 33. Pp. 45-59. doi.org/10.3906/muh-0901-6
17. Akbarzadeh H., Maghsoudi A.A. Experimental and analytical investigation of reinforced high strength concrete continuous beams strengthened with fiber reinforced polymer // Materials and Design. 2010. Vol.31. Pp. 1130-1147. doi.org/10.1016/j.matdes.2009.09.041
18. Araba A., Ashour A. Flexural performance of hybrid GFRP-steel reinforced concrete continuous beams // Composites Part B. 2018. Vol. 154. Pp. 321–336. doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.077.

REFERENCES

1. Krylov S.M., Gushcha Yu.P., Abakanov M.S. Prochnost' staticheski neopredelimykh balok, armirovannykh stalyami bez ploshchadki tekuchesti [Strength of statically indeterminate beams reinforced with steels without a yield plateau]. *Sbornik NIIZHB: Prochnost', zhestkost' i treshchinostoykost' zhelezobetonnykh konstruksiy*. 1979. Pp. 40-41. (rus)
2. Smolyago G.A., Zhdanov A.E., Drokin S.V., Dronov A.V. Raschet mnogoproletnykh zhelezobetonnykh balok po metodu zadannykh deformatsiy [Calculation of multi-span reinforced concrete beams using the method of specified deformations]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2014. Vol. 12. Pp. 59-61. (rus)
3. Tamrazyan A.G., Sayed Y.A.K. Eksperimental'noye issledovaniye koeffitsiyenta pereraspredeleniya momentov v staticheski neopredelimykh zhelezobetonnykh balkakh [Experimental study of the coefficient of moment Redistribution in statically indeterminate rc beams]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2023. No. 5. Pp. 24–35. [doi.org:10.33979/2073-7416-2023-109-5-24-35](https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-109-5-24-35). (rus)
4. Sayed Y.A.K. Issledovaniye pereraspredeleniya momentov v staticheski neopredelimykhkorrodirovannyye zhelezobetonnyye balki [Study of moment redistribution in statically indeterminate corroded reinforced concrete beams]. *Engineering Bulletin of the Don*. 2024. No. 1. (rus)
5. Gil A.I., Lazovsky E.D. Issledovaniye pereraspredeleniya momentov v staticheski neopredelimykh korrodirovannykh zhelezobetonnykh balkakh [Analysis of experimental research results of continuous reinforced concrete beams with combined reinforcement of the tensile zone above the intermediate support with composite and steel reinforcement]. *Bulletin of BrSTU*. 2023. No. 2. Vol. 131. Pp. 3-8. [doi.org:10.36773/1818-1112-2023-131-2-3-8](https://doi.org/10.36773/1818-1112-2023-131-2-3-8). (rus)
6. Mailyan L.R. Pereraspredeleniye usiliy v staticheski neopredelennykh zhelezobetonnykh balkakh [Redistribution of forces in statically indeterminate reinforced concrete beams]. *News of higher educational institutions. Construction and architecture*. 1983. No. 4. Pp. 6. (rus)

7. Nikulin A.I., Sotnikov D.Y., Kazakov D.V. Pereraspredeleniye usiliy v staticheskikh raschotakh nerazreznykh zhelezobetonnykh balok [Redistribution of forces in static calculations of continuous reinforced concrete beams]. *Bulletin of the Oryol State Technical University. Series: Construction and transport*. 2008. No. 17. Pp. 34-37. (rus)
8. Smolyago G.A., Obernikhina Ya.L., Obernikhin D.V. Vliyaniye vneshnego armirovaniya ugleplastikom na pereraspredeleniye usiliy v nerazreznykh zhelezobetonnykh balkakh [Influence of external reinforcement with carbon fiber on the redistribution of forces in continuous reinforced concrete beams]. *Architecture. Construction. information technologies - 2023 (ASIT-2023)*. 2023. Pp. 33-34. (rus)
9. Popov D.S. Chislennyye issledovaniya pereraspredeleniy usiliy v staticheski neopredelimykh korrozionno-povrezhdennykh zhelezobetonnykh balkakh [Numerical Investigations of Stress Redistributions in Statically Indeterminate Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams]. *Engineering Bulletin of the Don*. 2023. No. 4. Vol. 100. Pp. 591-610. (rus)
10. Grace N.F., Sayed G.A., Saleh K.R. Strengthening of Continuous Beams Using Fibre Reinforced Polymer Laminates. *Fourth International Symposium on FRP Reinforcement for RC Structures. ACI*. 1999. Pp. 647-657.
11. Grace N.F. Strengthening of Negative Moment Region of RC Beams Using CFRP Strips. *ACI Struct. J*. 2001. Vol. 98. No. 3. Pp. 347-357.
12. El-Refaie S.A., Ashour A.F., Garrity S.W. Sagging and hogging strengthening of continuous reinforced concrete beams using carbon fiber-reinforced polymer sheets. *ACI Struct. J*. 2003. Vol. 100. Pp. 446-453. doi.org/10.14359/12653.13.
13. El-Refaie S.A., Ashour A.F., Garrity S.W. CFRP strengthened continuous concrete beams. *Proceedings of the ICE - Structures and Buildings*. 2003. Vol. 156. No. 4. Pp. 395-404. doi.org/10.1680/stbu.2003.156.4.395 14.
14. Aly H.A., Nasr E.A., El-Ghandour A.A., Abdelrahman A.A. Moment redistribution in RC continuous beams strengthened in flexure by CFRP laminates. *FRP Composites in Civil Engineering - CICE*. 2004. Pp. 227-235. doi.org/10.1201/9780203970850.ch22.
15. Aiello M.A., Valente L., Rizzo A. Moment redistribution in continuous reinforced concrete beams strengthened with carbon-fiber-reinforced polymer laminates. *Mech. Compos. Mater.* 2007. Vol. 43. Pp. 453-66. doi.org/10.1007/s11029-007-0043-x 16.
16. Maghsoudi A.A., Bengar H. Moment redistribution and ductility of RHSC continuous beams strengthened with CFRP. *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 2009. Vol. 33. Pp. 45-59. doi.org/10.3906/muh-0901-6 17.
17. Akbarzadeh H., Maghsoudi A.A. Experimental and analytical investigation of reinforced high strength concrete continuous beams strengthened with fiber reinforced polymer. *Materials and Design*. 2010. Vol.31. Pp. 1130-1147. doi.org/10.1016/j.matdes.2009.09.041 18.
18. Araba A., Ashour A. Flexural performance of hybrid GFRP-steel reinforced concrete continuous beams. *Composites Part B*. 2018. Vol. 154. Pp. 321–336. doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.077.

Информация об авторах:

Обернихина Яна Леонидовна

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)», г. Белгород, Россия,
старший преподаватель кафедры Строительства и городского хозяйства.
E-mail: yana.ishuk@yandex.ru

Смоляго Геннадий Алексеевич

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)», г. Белгород, Россия,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Строительства и городского хозяйства.
E-mail: str-exp@mail.ru

Information about authors:

Obernikhina Yana L.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation,
Senior Lecturer of the Department of Construction and Urban Economics.
E-mail: yana.ishuk@yandex.ru

Smolyago Gennadiy A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation,
D.Sc. in Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction and Urban Economics,
E-mail: str-exp@mail.ru

С.Н. ОВСЯННИКОВ^{1,2}, А.С. САМОХВАЛОВ^{1,2}¹Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия²Научно-исследовательский институт строительной физики, Москва, Россия

ЗВУКОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ ОГРАЖДЕНИЯ С МАЛЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ, ВКЛЮЧАЯ ВОЗДУХООБМЕННЫЕ УСТРОЙСТВА

Аннотация. Исследовалась звукоизоляция сложных ограждающих конструкций, включающих малые технические элементы, в том числе воздухопроводы, проходящие через внутренние конструкции, и воздухообменные устройства в наружных конструкциях. На примере воздухообменных каналов и клапана «КИВ 125» показано их влияние на звукоизоляцию многослойных остеклений. Представлены результаты измерения звукоизолирующей способности одно- трехслойных остеклений с воздухообменными устройствами. Использованы стандартные методы измерения звукоизоляции ограждающих конструкций и малых технических элементов. Измерение звукоизоляции одно- и многослойных остеклений с воздухообменными элементами позволило выявить влияние воздухообменного канала и количества элементов остекления на звукопередачу через данный тип конструкций и разработать методику проектирования шумозащитных окон в сочетании с вентиляционными каналами или воздухообменными устройствами.

Ключевые слова: звукоизоляция, прохождение звука, многослойные остекления воздухообменные устройства.

S.N. OVSYANNIKOV^{1,2}, A.S. SAMOKHVALOV^{1,2}¹Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia²Research Institute of building physics, Moscow, Russia

SOUND TRANSMISSION THROUGH ENCLOSING STRUCTURES WITH SMALL TECHNICAL ELEMENTS, INCLUDING AIR EXCHANGE DEVICES

Abstract. The sound insulation of complex enclosing structures, including small technical elements, including air ducts passing through internal structures and air exchange devices in external structures, was studied. Using the example of air exchange channels and the KIV 125 air exchange device, their effect on the sound insulation of multilayer glazing is shown. The results of measuring the sound insulation ability of single- and three-layer glazing with air exchange devices are presented. Standard methods for measuring the sound insulation of enclosing structures and small technical elements were used. The measurement of sound insulation of single- and multi-layer glazing with air exchange elements made it possible to identify the influence of the number of glazing elements and the air exchange channel on sound transmission through this type of structures and to develop a methodology for designing noise-proof windows in combination with ventilation ducts or air exchange devices.

Keywords: sound insulation, sound transmission, multilayer glazing, air exchange device.

Введение

Проблема передачи звука через сложные ограждающие конструкции, имеющие в своем составе легкие многослойные глухие или светопрозрачные элементы в сочетании с элементами, имеющими значительно меньшую звукоизоляцию и предназначенными для пропуска коммуникаций или воздухообмена, исследована недостаточно.

© Овсянников С.Н., Самохвалов А.С., 2024

В то же время существует потребность решения таких задач, например, в расчетах звукоизоляции перегородок с проходящими через них воздуховодами, или многослойных шумозащитных окон с вентиляционными устройствами.

В зарубежной практике проектирования звукоизоляции сложных конструкций, состоящих из нескольких элементов, в соответствии с ЕН 12354-1, предлагается определять звукоизоляцию самой конструкции и учитывать вклад прямого звука через так называемый «малый технический элемент», для которого звукоизоляция оценивается как «приведенная разность уровней элемента» по ИСО 10140-1. В России эти документы получили статус государственного стандарта (ГОСТ Р ЕН 12354-1-2012 и ГОСТ Р ИСО 10140-1-2012), однако в литературе пока не встречается описание использования данной методики. Понятие «малый технический элемент» дано в ГОСТ Р ИСО 10140-1-2012, как «строительное изделие, исключая окна и двери, площадью менее 1 м²..., передающее шум независимо от прилегающих строительных конструкций».

В российской нормативной литературе расчет звукоизоляции составных ограждений, в том числе с отверстиями и щелями, предлагается выполнять по п. 9.9. СП 275. Эта методика основана на определении «звукоизоляции отверстия или щели», однако, измерить и определить собственно звукоизоляцию отверстия безотносительно от ограждающей конструкции не представляется возможным вследствие малости площади отверстия в ограждении. Поэтому в ГОСТ Р ИСО 10140-1 и ГОСТ Р ИСО 10140-1 для малых технических элементов оценивается «приведенная разность уровней элемента». Разница между звукоизоляцией и приведенной разностью уровней заключается в приведении относительно площади конструкции или стандартного звукопоглощения 10 м², что для элементов с малой площадью имеет существенное значение.

В отечественных и зарубежных работах расчет звукоизоляции однослойных ограждений ведется на основе волновой теории с учетом резонансных эффектов. Основы теории звукоизоляции однослойных пластин без учета их конечных размеров заложены в исследованиях Рэлея [1], установленная им зависимость звукоизоляции от частоты известна как «закон масс». Позднее Л. Кремер [2] исследовал звукоизоляцию однослойных конструкций в области частоты волнового совпадения, где длина изгибной волны в конструкции и след длины волны в воздухе становятся равны, в зависимости от угла падения, что приводит к снижению звукоизоляции. Исследования звукоизоляции ограждающих конструкций конечных размеров показали влияние форм колебаний однослойных панелей прямоугольной формы - угловых и краевых мод, которые на низких частотах совпадают с тангенциальными модами колебаний воздуха в помещениях [3]. Для конструкций конечных размеров на частотах ниже частоты волнового совпадения существенное влияние оказывает нерезонансная звукопередача [4]. Ее вклад в звукоизоляцию однослойных конструкций исследован в работах М.С. Седова [5] и Сэвелла [6]. Резонансная звукопередача в области и выше частоты волнового совпадения исследована в работе Г. Майданика [7], основные его выражения использованы в методике расчета звукоизоляции Р. Жосса и Дж. Ламура [8]. Эта методика вошла сначала в европейские нормы, а затем и в ГОСТ Р ЕН 12354-1-2012. Как показывают наши измерения и расчеты [9] она достаточно проста и дает хорошую сходимость с результатами измерений однослойных ограждений, и, по нашему мнению, более адекватна, чем другие модели прохождения звука через однослойные прямоугольные пластины [10].

Для многослойных ограждений, в частности, остеклений существенное влияние на звукоизоляцию оказывают резонансы типа «масса-упругость-масса». Исследованиям звукоизоляции многослойных ограждений занимались многие ученые, как в России, так и за рубежом. Первые зарубежные работы принадлежат А. Лондону [11]. Для двойных ограждений до практического применения доведена методика К. Гезеле [12, 13], предложившего рассчитывать резонансную частоту двойного остекления, вычисленную как для механической

системы, состоящей из двух масс и одного упругого элемента. Весь расчетный диапазон частот он разделил на 3 области и для каждой предложил расчетные формулы, в основу которых входило суммирование звукоизоляции одинарных конструкций. В России вопросами инженерного расчета звукоизоляции одинарных и двойных конструкций занимались Г.Л. Осипов, В.И. Заборов и ряд других ученых. Расчетам резонансных частот и звукоизоляции одно- двух- и трехслойных остеклений посвящен ряд работ Р.Ю. Винокура [14-16]. Следует, однако, отметить, что в ряде отечественных и зарубежных работ использованы выражения для определения коэффициентов прохождения на частотах выше резонансных, значительно завышающие звукоизоляцию. Системной ошибкой решений в [17, 18, 19], является рост звукоизоляции двойных и тройных остеклений с темпом 12...18 (до 24 дБ) на октаву и достижение чрезвычайно высоких расчетных значений звукоизоляции этих легких конструкций (до 100 дБ), что никак не подтверждается практикой наших измерений [9, 20] и измерений других лабораторий.

Влиянием отверстий различной формы на звукоизоляцию ограждений посвящен ряд работ. В работе [21] исследована звукоизоляция перегородок с отверстиями с точки зрения разборчивости речи и обеспечения конфиденциальности, в работе [22] эти же авторы в натурных условиях исследовали 16 вариантов воздухообменных устройств в наружных конструкциях с точки зрения их акустических характеристик. Ряд работ посвящен методам снижения шума, проходящего через наружные ограждения с естественной вентиляцией, путем экранирования и акустической обработки отверстий [23, 24, 25]. Численному расчету звукоизоляции вентилируемых окон при одинарном и двойном остеклении и разными сочетаниями отверстий посвящена работа [26]. В статье [27] предложена конструкция двойного остекления с вентиляцией через воздушный промежуток и показаны результаты экспериментальных исследований звукоизоляции. В работе [28] экспериментально исследована звукоизоляция 18 типов светопрозрачных фасадов с двойным остеклением и вентиляцией через межстекольное пространство. В иностранной литературе модным направлением является применение «метасистем», так в работе [29] предложено использовать концепцию акустических метакаркасов, другими словами, встроенных в воздуховод резонаторов, снижающих уровень проходящего с воздухом шума. Подобные разработки представляют интерес для использования в теплом климате, поскольку любой вариант воздухообмена через в межстекольное пространство в морозном климате неизбежно приводит к накоплению конденсата и их обмерзанию.

Шумозащитные окна для климата России должны представлять собой многослойные герметичные конструкции, которые имеют дополнительно воздухообменные устройства в каналах, устроенных в непосредственно стене или откосах проемов. Целью данной работы показать решение задачи звукоизоляции многослойных конструкций с малыми техническими элементами на примере одно-трехслойных остеклений с воздухообменными устройствами, в частности с прямоточным клапаном КИВ 125.

Модели и методы

На протяжении ряда лет нами выполнялись исследования звукоизоляции многослойных остеклений в сочетании с воздухообменными устройствами. В работе [20] показаны результаты конструирования шумозащитных окон с воздухообменными устройствами и результаты исследования их звукоизоляции. В работе [9] представлена методика и результаты расчета звукоизоляции одинарных остеклений в одинарных переплетах с одно- и двухкамерными стеклопакетами, показана хорошая сходимость этих результатов с результатами измерений. Авторами выполнены также теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляции остеклений в отдельных переплетах с числом стекол до 5, которые предполагается опубликовать в ближайшее время. В этих работах представлены аналитические решения для коэффициентов резонансного и нерезонансного прохождения

звука, которые позволяют вычислить звукоизоляцию многослойных ограждений при различных размерах и заполнении воздушных промежутков.

Результаты и обсуждения

Для обеспечения естественной вентиляции помещений зданий неизбежно приходится использовать воздухообменные устройства, обеспечивающие приток свежего воздуха с необходимой кратностью воздухообмена. С точки зрения звукоизоляции использование приточных устройств играет положительную роль, поскольку альтернативой им являются открытые створки или форточки, что приводит к снижению звукоизоляции окна до 10...15 дБА, т.е. светопрозрачная конструкция теряет свои звукоизолирующие свойства. В настоящее время применяется целая линейка воздухообменных устройств. Их можно разделить на несколько групп. Европейские производители предлагали на российский рынок различные щелевые устройства типа «AEROMAT», «VentAir» и ряд других, устраиваемые в переплетах или вместо части стеклопакета. Такие конструкции практически непригодны для холодного климата, поскольку обмерзают и не пропускают воздух. Эти решения имеют и крайне слабую звукоизоляцию. Другие решения представляют собой отверстие в стене с вентрешеткой снаружи и регулируемой заслонкой изнутри, а в самом канале размещаются теплоизоляционные вкладыши, которые отчасти выполняют и роль звукопоглотителя. К числу таких устройств можно отнести «КИВ – 125», стеновой вентклапан «СВК В-75» и ряд других аналогичных решений. В последние годы появились приточные устройства с побуждением электрическим вентилятором, с фильтрами для очистки воздуха и некоторые с функцией рекуперации. К числу таких устройств относятся «Aeromat», «Aerovital», «Аэропак-90SN», «Aerolife» и целая линейка других устройств, также имеющих прямой канал в отверстии в стене и ряд функциональных элементов, расположенных во внутреннем блоке с разными возможностями управления.

К сожалению, большинство производителей этих устройств представляют лишь некоторые технические характеристики, преимущественно имеющие рекламный характер. Нет протоколов измерений с характеристиками звукоизоляции, полученными стандартными методами по ГОСТ 27296-2012, ГОСТ Р ИСО 10140-2 –2012 и ГОСТ Р 56769-2015 (ИСО 717-1:2013).

Согласно ГОСТ Р ИСО 10140-2-2012 приточные вентиляционные устройства являются «малыми техническими элементами», характеристикой их звукоизоляции является приведенная разность уровней звукового давления между двумя реверберационными камерами, в проеме между которыми установлена стена с высокой звукоизоляцией, в которой выполнено отверстие и на нем смонтировано исследуемое устройство. Приведенная разность уровней звукового давления, как и при измерении звукоизоляции, определяется по ГОСТ 27296-2012 по 6 точкам размещения микрофона и при перемещении источника звука в 3 позиции в камере высокого уровня. При этом посредством измерения времени реверберации определяется и эквивалентное звукопоглощение A в приемном помещении. Приведенная разность уровней находится как:

$$D_n = L_1 - L_2 - 10 \lg \frac{A}{A_0}. \quad (1)$$

где $A_0 = 10 \text{ м}^2$ – стандартное звукопоглощение.

По спектру приведенной разности уровней можем получить также значения одним числом со спектральными поправками $D_{nw}(C, C_{tr})$.

Суммарная звукоизоляция окна совместно с воздухообменным клапаном может быть получена с использованием формулы (16) СП 275:

$$R_{\text{ок+кл}} = 10 \lg \frac{S_{\text{общ}}}{\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{10^{0,1R_i}}} \quad (2)$$

где $S_{\text{общ}}$ – суммарная площадь окна вместе со сквозным отверстием клапана;

S_i – площади стены, окна и клапана;

R_i – звукоизоляция стены, окна и клапана.

Расчеты по этой формуле не дают корректного результата, поскольку площадь канала клапана весьма мала, а звукоизоляция отверстия сама по себе не имеет смысла без конструкции стены.

Стена, как правило, имеет значительно большую звукоизоляцию, чем окно, поэтому следует оценивать только звукоизоляцию окна совместно с приточным клапаном. В третьоктавных полосах звукоизоляция окна с клапаном:

$$R_{\text{ок+кл}} = 10 \lg \frac{S_{\text{ок}}}{\frac{S_{\text{ок}}}{10^{0,1R_{\text{ок}}} + 10^{0,1(10 \lg A_0 - D_n)}}} = 10 \lg \frac{S_{\text{ок}}}{10^{0,1R_{\text{ок}}} + 10^{(1-0,1D_n)}} \quad (3)$$

Индекс изоляции воздушного шума окна с клапаном может быть получен, зная приведенный индекс снижения шума клапаном:

$$R_{W(\text{ок+кл})} = 10 \lg \frac{S_{\text{ок}}}{10^{0,1R_{W\text{ок}}} + 10^{(1-0,1D_{nw})}} \quad (4)$$

Индекс изоляции транспортного шума окном с приточным клапаном:

$$R_{\text{Атран(ок+кл)}} = 10 \lg \frac{S_{\text{ок}}}{\frac{S_{\text{ок}}}{10^{0,1R_{\text{Атран.ок}}}} + 10^{(1-0,1(D_{nw} + C_{tr}))}} \quad (5)$$

Связь между величинами звукоизоляции и приведенным перепадом звукового давления зависит только от размеров проема между реверберационными камерами:

$$D_n = R + 10 \lg \frac{A_0}{S_{np}} \quad (6)$$

где S_{np} – площадь проема между реверберационными камерами.

Исследования звукоизоляции некоторых приточных вентиляционных устройств выполнены в реверберационных камерах Томского ГАСУ, а также в натурных условиях при измерениях звукоизоляции различных типов окон с воздухообменными клапанами.

На первом этапе в реверберационных камерах выполнены измерения звукоизоляции стены в проеме 7 м² толщиной 410 мм из кирпичной кладки 250 мм плюс кладка из пенобетонных блоков «Сибит», толщиной 150 мм плотностью 600 мм, оштукатуренной с двух сторон тонким слоем штукатурки до 5 мм. Измерения показали для стены $R_w(C; C_{tr}) = 53 (-1; -4)$. Затем измерены приведенные разности уровней звукового давления стеной с отверстием диаметром 125 мм (рис. 1).



Рисунок 1 – Измерения звукоизоляции остеклений с клапаном КИВ 125 мм в реверберационных камерах Томского ГАСУ, вид из камеры низкого уровня и высокого уровня.

Результаты измерения звукоизоляции стены без отверстия и с отверстием, а также приведенной разности уровней для отверстия показаны на графиках рис. 2.

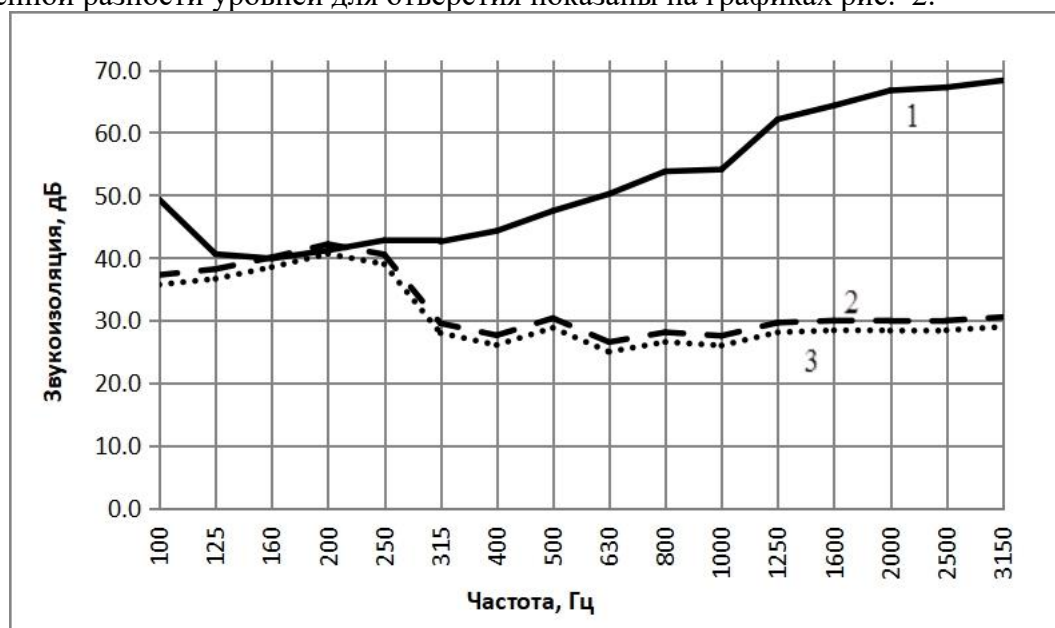


Рисунок 2 – Графики звукоизоляции: 1 – звукоизоляция стены 410 мм; 2 – график приведенной разности уровней за отверстием D125 мм в стене; 3 – звукоизоляция стены с отверстием D125 мм

Как видим, звукоизоляция стены с отверстием и приведенная разность уровней для клапана отличаются во всем диапазоне частот на 1,5 дБ. На низких частотах 160-200 Гц наблюдается максимальное снижение уровня звука за стеной с отверстием, а звукоизоляция стены без отверстия и с открытым отверстием в стене практически равны. Это означает, что звукоизоляция «малого технического элемента» отверстия в стене – равна на этих частотах звукоизоляции самой стены. На частотах свыше 250 Гц звукоизоляция стены с проемом падает до 30 дБ.

На рис. 3 представлена частотная характеристика снижения шума приточным клапаном КИВ 125 в открытом и закрытом состоянии в сборе с наружной решеткой, звукопоглощающим минераловатным рукавом в канале и внутренней регулируемой заслонкой в сравнении со звукоизоляцией стены в которой он установлен.

Приведенная разность уровней для КИВ 125 в закрытом состоянии составляет $D_{nw}(C; C_{tr}) = 44 (0;-2)$, в открытом $D_{nw}(C; C_{tr}) = 36 (0;-2)$, открывание клапана снижает звукоизоляцию сразу на 8 дБ. Из результатов измерений, показанных на рис. 2, видим, что приведенная разность уровней для клапана КИВ 125 выше, чем для отверстия в стене, и она растет на частотах от 800 Гц благодаря жалюзийным заслонкам и звукопоглощению минераловатным рукавом. Этот график показывает предельную звукоизоляцию, которую можно достичь шумозащитным окном в сочетании с приточным клапаном. Очевидно, что с клапаном такой конструкции не имеет смысла применять остекление с более высокой звукоизоляцией.

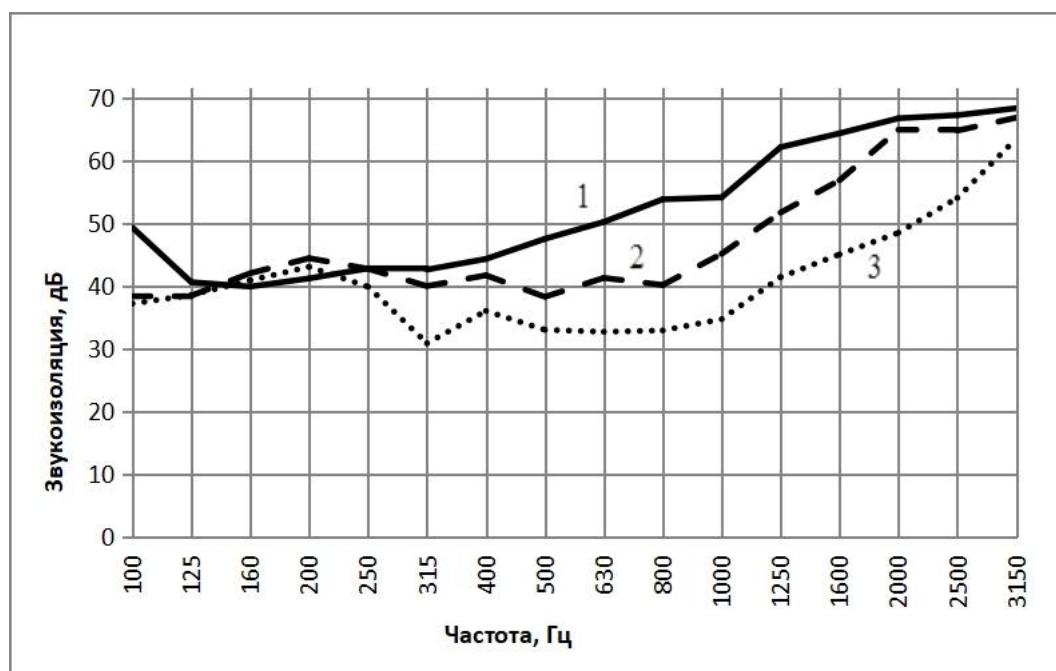


Рисунок 3 – Графики звукоизоляции стены 410 мм с приточным клапаном КИВ 125 мм: 1 – звукоизоляция стены 410 мм; 2 – график приведенной разности уровней для клапана в закрытом состоянии; 3 – график приведенной разности уровней для клапана в открытом состоянии

На следующем этапе выполнены измерения звукоизоляции одно- пятислойных остеклений совместно с открытым и закрытым приточным клапаном КИВ 125. В настоящей статье показаны результаты измерений одно-трехслойных остеклений без клапана и с клапаном КИВ 125. Это наиболее широко используемый вариант для окон в одинарных переплетах.

На рис. 4 показаны частотные характеристики звукоизоляции стены с оконным проемом, заполненным однослойным остеклением 4 мм с клапаном КИВ 125 в открытом и закрытом состоянии, в сравнении со звукоизоляцией стены и однослойного остекления 4 мм, а на рис. 5 с двухслойным остеклением с формулой остекления 4+12+4. На рис. 6 показаны частотные характеристики звукоизоляции стены с оконным проемом, заполненным трехслойным остеклением с формулой 4+12+4+12+4 с клапаном КИВ 125 в открытом и закрытом состоянии, в сравнении со звукоизоляцией стены и трехслойного остекления 4+12+4+12+4 мм.

В табл. 1 сведены результаты измерений звукоизоляции 3 типов остеклений с приточным клапаном КИВ 125.

Из графиков звукоизоляции видим, что прямооточный клапан КИВ 125 ухудшает звукоизоляцию остекления в области средних и высоких частот, начиная с 315 Гц, и чем выше звукоизоляция многослойного остекления, тем наблюдается больше снижение звукоизоляции остекления клапаном. Из этого следует вывод о необходимости применения приточных клапанов сложной конфигурации с 1, 2 или 3 поворотами и звукопоглощающими вкладышами на участках воздуховода.

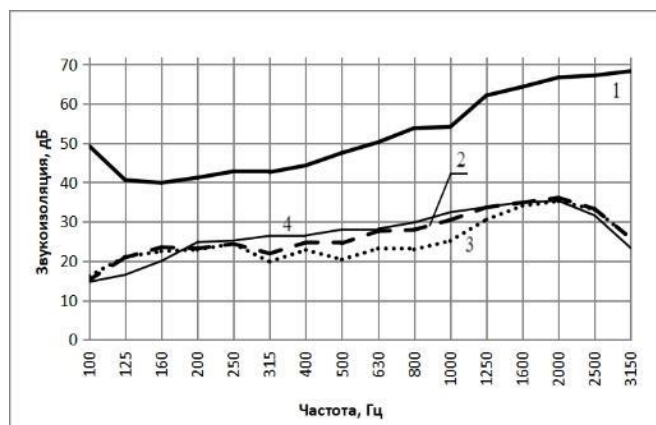


Рисунок 4 – Графики звукоизоляции однослойного остекления 4 мм с приточным клапаном КИВ 125 мм в стене 410 мм: 1 – звукоизоляция стены 410 мм; 2 – клапан в закрытом состоянии; 3 – клапан в открытом состоянии; 4 – однослойное остекление 4 мм.

Таблица 1 – Звукоизоляция остеклений с открытым и закрытым клапаном КИВ125

Наименование остекления	Звукоизоляция остекления без клапана $R_w (C; C_{tr}), \text{дБ}$	Звукоизоляция остекления с закрытым клапаном $R_w (C; C_{tr}), \text{дБ}$	Звукоизоляция остекления с открытым клапаном $R_w (C; C_{tr}), \text{дБ}$
Однослойное 4 мм	30 (-1,5; -2,5)	28 (-0,5; -1,5)	26 (-0,0; -1,5)
Двойное 4+12+4	32 (-1,5; -4,5)	31 (-1,0; -3,5)	27 (-0,5; -2,5)
Тройное 4+12+4+12+4	34 (-2,0; -6,0)	32 (-1,0; -5,0)	27 (-0,0; -2,5)

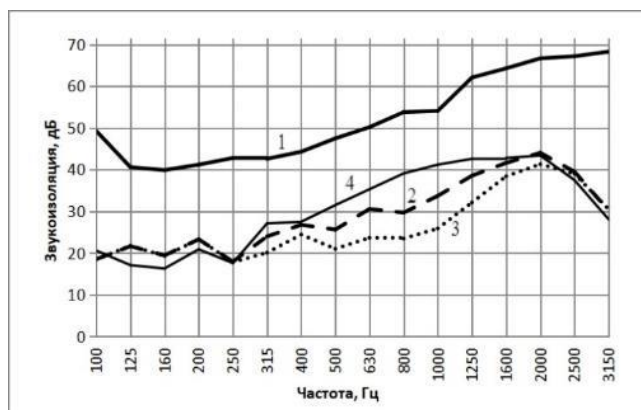


Рисунок 5 – Графики звукоизоляции двухслойного остекления 4+12+4 с приточным клапаном КИВ 125 мм в стене 410 мм: 1 – звукоизоляция стены 410 мм; 2 – клапан в закрытом состоянии; 3 – клапан в открытом состоянии; 4 – звукоизоляция остекления 4+12+4

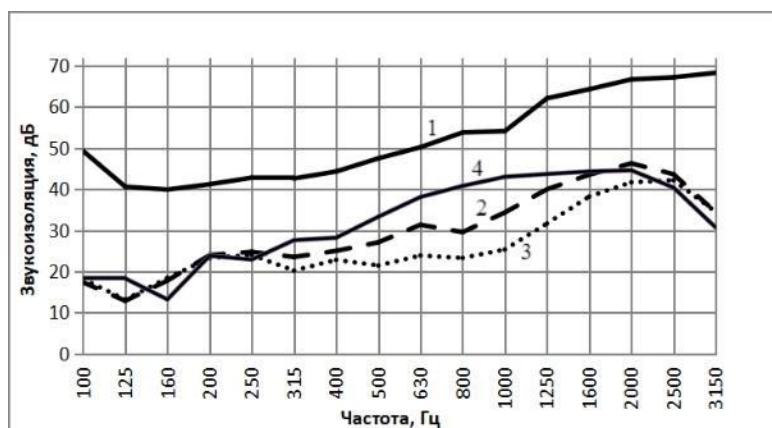


Рисунок 6 - Графики звукоизоляции трехслойного остекления 4+12+4+12+4 с приточным клапаном КИВ 125 мм в стене 410 мм: 1 – звукоизоляция стены 410 мм; 2 – клапан в закрытом состоянии; 3 – клапан в открытом состоянии; 4 – остекление 4+12+4+12+4

В Томском ГАСУ разработаны технические решения приточных клапанов [9], в составе дополнительного блока окна или в откосах проемов (см. рис. 7, 8). Эти простейшие устройства имеют минимальные затраты на изготовление и в то же время обеспечивают существенно большую звукоизоляцию в режиме проветривания. График звукоизоляции окна с двухкамерным стеклопакетом и открытым трехколенным клапаном (на рис. 8 справа) показан на рис. 9, как видим, что это устройство вместе с двухкамерным стеклопакетом имеет более высокую звукоизоляцию в области средних и высоких частот, в отличие от КИВ 125.

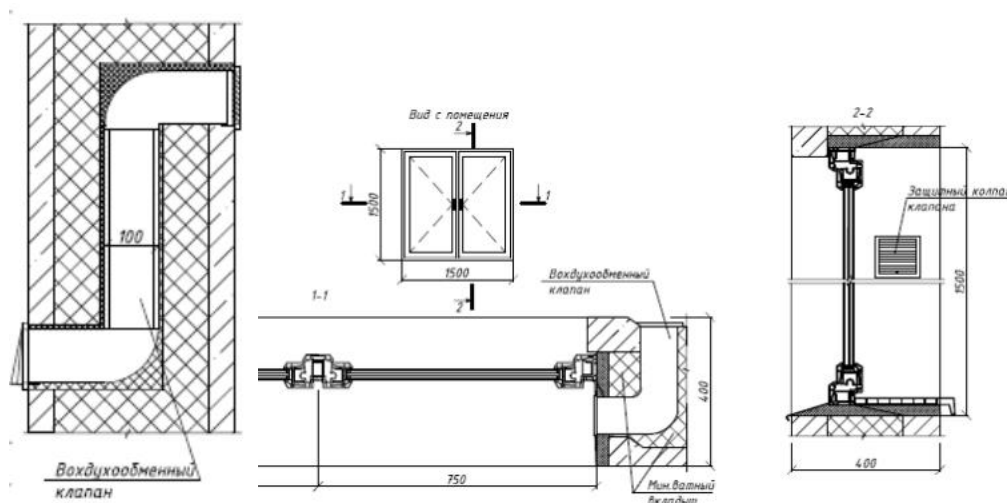


Рисунок 7 – Принципиальные решения воздухообменных клапанов для архитектурно-конструктивной системы «КУПАСС» каркасно-панельного здания



Рисунок 8 – Принципиальные решения воздухообменных клапанов для здания с кирпичными стенами

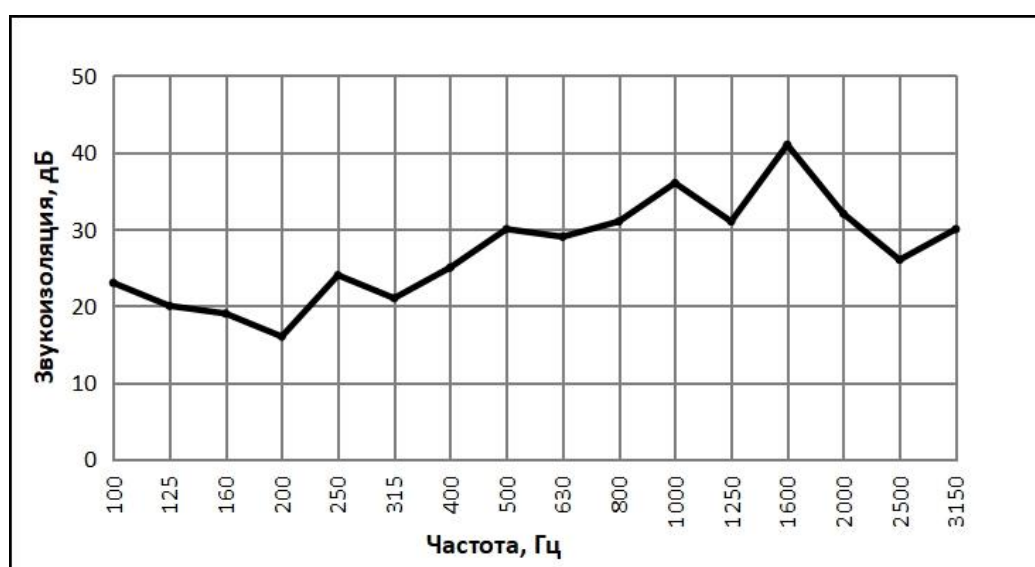


Рисунок 9 - Звукоизоляция окна с двухкамерным стеклопакетом (4+14+4+14+4) и открытым приточным клапаном с 3 поворотами на 90 градусов $R_w=29$ (-1; -2)

Выводы

1. Звукоизоляция легких многослойных ограждающих конструкций без малых технических элементов зависит от соотношения поверхностных масс и толщин воздушных промежутков. Добавление третьего стекла в двухкамерном стеклопакете практически не увеличивает звукоизоляцию по сравнению с однокамерным двойным остеклением. Для существенного увеличения звукоизоляции необходимо применять конструкции остеклений в раздельных переплетах, где один из воздушных промежутков превышает 150 мм.

2. В расчетах звукоизоляции ограждений с малыми техническими элементами следует использовать приведенные разности уровней звукового давления, измеренные в соответствии с ГОСТ 27296-2012 и ГОСТ Р ИСО 10140-2-2012, а не звукоизоляцию малого технического элемента (отверстие, щель), как предусмотрено в п. 9.9. СП 275, вследствие несопоставимо малой его площади.

3. Наличие в составе ограждающей конструкции прямого воздухообменного канала снижает звукоизоляцию на 10...15 дБ в области средних частот, что не позволяет добиться высокой звукоизоляции даже при увеличении числа слоев ограждения и их поверхностной массы.

4. При проектировании воздухообменных устройств следует использовать конструкции каналов с несколькими поворотами и звукопоглощающей отделкой каналов. Это позволяет не менее чем на 2 дБА увеличить звукоизоляцию трехслойного остекления в режиме проветривания по сравнению с прямоточными устройствами типа КИВ 125. Для шумозащитных окон в раздельных переплетах такие воздухообменные устройства дают существенно больший эффект.

5. Следует отметить необходимость получения паспортных характеристик звукоизоляции для различных «малых технических элементов», в том числе и для воздухообменных устройств, с включением этих справочных данных в СП 275. Использование этих данных с расчетными формулами для вычисления звукоизоляции различных остеклений [9] позволяет проектировать шумозащитные окна для зданий на шумных территориях.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке ФНИ РААСН, проект 3.1.4.5.

Acknowledgements

The work was carried out with the support of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, project 3.1.4.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rayleigh (J.W. Strett). Theory of sound. T.2. Translation from English, edited by S.M. Rytov. Moscow: Gostekhstroyizdat. 1955. 476 p.
2. Cremer L. Theorie der Schalldämmung Wände bei schrägen Einfall // Akust. Zeite. 1942, Bd. 7, No 3, pp. 81–104.
3. Bhattacharya M.C., Guy R.W., Crocker M.J. Coincidence effect with sound waves in a finite plate // J. of Sound & Vibration. 1971. Vol. 18. No 2, pp. 157–169.
4. Bhattacharya M.C., Crocker M.J. Forced vibration of a panel and radiation of sound into a room // Acustica. 1970. No 22, pp. 275–294.
5. Седов М.С. Звукоизоляция. Справочник «Техническая акустика транспортных машин»: Под ред. д-ра техн. наук профессора Н. И. Иванова. СПб: Политехника, 1992. Глава 4. С. 68–106.
6. Sewell K.B. Transmission of Reverberant Sound through a Single – Leaf Partition Surrounded by an Infinite Rigid Baffle // J. of Sound and Vibration. 1970. Vol. 12. No 1. pp. 21–32.
7. Maidanik G. Response of ribbed panels to reverberant acoustic fields. // J. of the Acoustical Society of America. – 1962. – V. 34. – № 6. – P. 809–826.
8. Josse, R., Lamure J. Transmission du son par une paroi simple // Acustica. 1964. pp. 266–280.
9. Овсянников С.Н., Самохвалов А.С., Звукоизоляция однослойных остеклений, одно- и двухкамерных стеклопакетов. // Жилищное строительство. 2023. № 12. С 12–17. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-12-17>.
10. Leppington, F.G., Broadbent, E.G. and Heron, K.H. The acoustic radiation efficiency of rectangular panels // Proceedings of the Royal Society of London, A382. 1982. pp. 45–71.
11. London A. Transmission of reverberant sound through double walls // J. Acoust. Soc. Amer. 1950. Vol. 22. No. 2, pp. 270–279.
12. Gosele K. Zur Luftschalldämmung von einschaligen Wänden und Decken. // Acustica. 1968. 20, p. 334.
13. Gosele K. Zur Berechnung der Luftschalldämmung von doppelschaligen bauteilen.// Acustica. 1980, 45, p. 208.
14. Винокур Р.Ю., Лалаев Э.М. Теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляционных стеклопакетов. // В книге: Борьба с шумом и звуковой вибрацией. М.: МДНТП. 1982. с. 62–67.
15. Vinokur, R., Transmission loss of triple partitions at low frequencies. // Applied Acoustics, 1990, Vol.29 (1), pp. 15–24.
16. Vinokur, R., Simple equation for multilayer sound insulation with no interlayer sound absorption at high frequencies. // ICSV 18, Rio de Janeiro, Brazil, 2011, pp. 1–5.
17. Tadeu A.J.B., Mateus D.M.R. Sound transmission through single, double and triple glazing. Experimental evaluation // Applied Acoustics. 2001. Vol.62, pp. 307–325. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(00\)0032-3](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(00)0032-3).

18. Xin F.X., Lu T.J. Analytical modeling of sound transmission through clamped triple-panel partition separated by enclosed air cavities // *European Journal of Mechanics A/Solids*. 2011. Vol. 30, pp. 770–782. <https://doi.org/10.1016/euromechsol.2011.14.013>
19. Kurra S. Comparison of the models predicting sound insulation values of multilayered building elements // *Applied Acoustics*. 2012. Vol.73, pp. 575–589. <https://doi.org/10.1016/apacoust.2011.11.008>.
20. Овсянников С.Н., Самохвалов А.С. Окна в отдельных переплетах с высокой тепло-звукоизоляцией // *Строительные материалы*. 2012. № 6. С. 42–43.
21. Bibby C., Hodgson M. Prediction study of factors affecting speech privacy between rooms and the effect of ventilation openings. // *Applied Acoustics*. 2013. Vol. 74. pp. 585–590.
22. Bibby C., Hodgson M. Field measurement of the acoustical and airflow performance of interior natural-ventilation openings and silencers. // *Building and Environment*. 2013. Vol. 67., pp. 265–273.
23. De Salis M.H.F., Oldham D.J., Sharples S. Noise control strategies for naturally ventilated buildings. // *Building and Environment*. 2002. Vol. 37, pp. 471 – 484.
24. Alonso A., Suarez R., Patricio J., Escandon R., Sendra J. J. Acoustic retrofit strategies of windows in facades of residential buildings: Requirements and recommendations to reduce exposure to environmental noise. // *Journal of Building Engineering*. 2021.102773. pp. 1–10.
25. Bajraktari E., Lechleitner J., Mahdavi A. Estimating the sound insulation of double facades with openings for natural ventilation. // *Energy Procedia*. 2015. Vol. 78 pp. 140 – 145.
26. Xiang Yu, Siu-Kit Lau b, Li Cheng c, Fangsen Cui. A numerical investigation on the sound insulation of ventilation windows. // *Applied Acoustics*. 2017. Vol.117. pp. 113–121.
27. Liangfen Du, Siu-Kit Lau, Siew Eang Lee, Danzer M. K. Experimental study on noise reduction and ventilation performances of sound-proofed ventilation window. // *Building and Environment*. 2020. Vol.181. 107105. pp. 1–9.
28. Urbán D., Roozen N.B., Zafko P., Rychtáriková M., Tomašovič P., Glorieux C. Assessment of sound insulation of naturally ventilated double skin facades. // *Building and Environment*. 2016, Vol 110. pp. 148–160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.10.004>.
29. Gioia Fusaro, Xiang Yu, Jian Kang, Fangsen Cui. Development of metacage for noise control and natural ventilation in a window system. // *Applied Acoustics*, 2020. Vol. 170. 107510., pp. 1–9.

REFERENCES

1. Rayleigh (J.W. Strett). *Theory of sound*. T.2. Translation from English, edited by S.M. Rytov. Moscow: Gostekhstroyizdat. 1955. 476 p.
2. Cremer L. Theorie der Schalldämmung Wände bei schrägen Einfall *Akust. Zeite*. 1942, Bd. 7, No 3, pp. 81–104.
3. Bhattacharya M.C., Guy R.W., Crocker M.J. Coincidence effect with sound waves in a finite plate. *J. of Sound & Vibration*. 1971. Vol. 18. No 2, pp. 157–169.
4. Bhattacharya M.C., Crocker M.J. Forced vibration of a panel and radiation of sound into a room. *Acustica*. 1970. No 22, pp. 275–294.
5. Sedov M.S. Soundproofing. Handbook "Technical acoustics of transport vehicles": Ed. Dr. tech. Sciences Professor N. I. Ivanov. St. Petersburg: Polytechnic, 1992. Chapter 4. S. 68–106.
6. Sewell K.B. Transmission of Reverberant Sound through a Single – Leaf Partition Surrounded by an Infinite Rigid Baffle. *J. of Sound and Vibration*. 1970. Vol. 12. No 1. pp. 21–32.
7. Maidanik G. Response of ribbed panels to reverberant acoustic fields. *J. of the Acoustical Society of America*. – 1962. – V. 4. – № 6. – P. 809–826.
8. Josse, R., Lamure J. Transmission du son par une paroi simple. *Acustica*. 1964. pp. 266–280.
9. Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S. Sound insulation of single-layer glazing, single- and double-chamber double-glazed windows. *Housing construction*. 2023. №. 12. pp. 12–17. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-12-17>.
10. Leppington, F.G., Broadbent, E.G. and Heron, K.H. The acoustic radiation efficiency of rectangular panels. *Proceedings of the Royal Society of London*, A382. 1982. pp. 45–71.
11. London A. Transmission of reverberant sound through double walls. *J. Acoust. Soc. Amer*. 1950. Vol. 22. No. 2, pp. 270–279.
12. Gosele K. Zur Luftschalldämmung von einschaligen Wänden und Decken. *Acustica*. 1968. 20, p. 334.
13. Gosele K. Zur Berechnung der Luftschalldämmung von doppelschaligen bauteilen. *Acustica*. 1980, 45, p. 208.

14. Vinokur R.Yu., Lalaev E.M. Theoretical and experimental studies of soundproof glass units. *In the book: Combating noise and sound vibration*. Moscow: MDNTP. 1982. pp. 62-67.
15. Vinokur, R., Transmission loss of triple partitions at low frequencies. *Applied Acoustics*, 1990, Vol.29 (1), pp. 15-24.
16. Vinokur, R., Simple equation for multilayer sound insulation with no interlayer sound absorption at high frequencies. *ICSV 18*, Rio de Janeiro, Brazil, 2011, pp. 1-5.
17. Tadeu A.J.B., Mateus D.M.R. Sound transmission through single, double and triple glazing. Experimental evaluation. *Applied Acoustics*. 2001. Vol.62, pp. 307–325. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(00\)0032-3](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(00)0032-3).
18. Xin F.X., Lu T.J. Analytical modeling of sound transmission through clamped triple-panel partition separated by enclosed air cavities. *European Journal of Mechanics A/Solids*. 2011. Vol. 30, pp. 770–782. <https://doi.org/10.1016/euromechsol.2011.14.013>
19. Kurra S. Comparison of the models predicting sound insulation values of multilayered building elements. *Applied Acoustics*. 2012. Vol.73, pp. 575–589. <https://doi.org/10.1016/apacoust.2011.11.008>.
20. Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S. Windows in separate bindings with high heat and sound insulation. *Housing construction*. 2012. No. 6. pp. 42–43 (In Russian).
21. Bibby C., Hodgson M. Prediction study of factors affecting speech privacy between rooms and the effect of ventilation openings. *Applied Acoustics*. 2013. Vol. 74. pp. 585–590.
22. Bibby C., Hodgson M. Field measurement of the acoustical and airflow performance of interior natural-ventilation openings and silencers. *Building and Environment*. 2013. Vol. 67., pp. 265-273.
23. De Salis M.H.F., Oldham D.J., Sharples S. Noise control strategies for naturally ventilated build-ings. *Building and Environment*. 2002.Vol. 37, pp. 471 – 484.
24. Alonso A., Suarez R., Patricio J., Escandon R., Sendra J. J. Acoustic retrofit strategies of windows in facades of residential buildings: Requirements and recommendations to reduce exposure to environmental noise. *Journal of Building Engineering*. 2021.102773. pp. 1-10.
25. Bajraktari E., Lechleitner J., Mahdavi A. Estimating the sound insulation of double facades with openings for natural ventilation. *Energy Procedia*. 2015. Vol. 78 pp. 140 – 145.
26. Xiang Yu, Siu-Kit Lau b, Li Cheng c, Fangsen Cui. A numerical investigation on the sound insula-tion of ventilation windows. *Applied Acoustics*. 2017. Vol.117. pp. 113–121.
27. Liangfen Du, Siu-Kit Lau, Siew Eang Lee, Danzer M. K. Experimental study on noise reduction and ventilation performances of sound-proofed ventilation window. *Building and Environment*. 2020. Vol.181. 107105. pp. 1-9.
28. Urbán D., Roozen N.B., Zařko P., Rychtáriková M., Tomařovič P., Glorieux C. Assessment of sound insulation of naturally ventilated double skin facades. *Building and Environment*. 2016, Vol 110. pp. 148-160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.10.004>.
29. Gioia Fusaro, Xiang Yu, Jian Kang, Fangsen Cui. Development of metacage for noise control and natural ventilation in a window system. *Applied Acoustics*, 2020. Vol. 170. 107510., pp. 1-9.

Информация об авторах

Овсянников Сергей Николаевич

ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск, Россия,
д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Архитектура гражданских и промышленных зданий»
E-mail: ovssn@tsuab.ru

Самохвалов Александр Сергеевич

ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», г. Томск, Россия,
старший преподаватель кафедры «Архитектура гражданских и промышленных зданий»
E-mail: tomsk117@mail.ru

Information about authors

Ovsyannikov Sergey N.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering”, Tomsk, Russia,
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of “Architecture of Civil and Industrial Buildings”
E-mail: ovssn@tsuab.ru

Samokhvalov Alexander S.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering”, Tomsk, Russia,
Senior Lecturer of the Department of “Architecture of Civil and Industrial Buildings”
E-mail: tomsk117@mail.ru

В.С. ФЁДОРОВ¹, Н.В. КУПЧИКОВА^{1,2}, С.С. РЕКУНОВ³, И.В. ФЕДОСЮК¹ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, Россия²ГБУ НИИ «МосТрансПроект», г. Москва, Россия³Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия⁴ООО «МКЛ Плюс», г. Волгоград, Россия

ФИЛЬТРАЦИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ГРУНТОВЫХ ПЕРЕМЫЧЕК ПЛОТИН КАК ВРЕМЕННЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Аннотация. Изучение влияния конструктивно-технологических решений устройства перемычек судоходных гидротехнических сооружений на фильтрационные процессы и устойчивость насыпи ядра плотины при эксплуатационных воздействиях. Метод исследования представляет собой численное моделирование процессов и аналитические методы исследования позволили получить результаты поставленной цели. В результате изучения влияния конструктивно-технологических решений устройства перемычек, как временных судоходных гидротехнических сооружений на фильтрационные процессы и устойчивость насыпи ядра плотины при эксплуатационных воздействиях выполнен анализ конструктивно-технологических решений устройства перемычек судоходных гидротехнических сооружений, анализ способов перекрытия русла реки, как процессов постепенного обжата потока до появления скоростей течения, размывающих русло реки и материал отсыпки. Выявлены критерии, обеспечивающие фильтрационную прочность грунта для отсыпки ядра грунтовой плотины. Проведено исследование потенциального разрушения перемычки при расчете на основное сочетание нагрузок с помощью численного моделирования. Выполнен анализ фильтрационной устойчивости перемычки методом конечных элементов при динамических воздействиях. Разработаны предложения для исключения скопления профильтровавшейся воды через тело перемычки. Фильтрационная устойчивость грунтовой перемычки, как временного гидротехнического сооружения обеспечивается, по действующему градиенту напора на контакте двух грунтов значительно меньше допустимого градиента, т.е. размыв отсутствует. Полученные результаты численного моделирования позволяют наблюдать более точный механизм разрушения перемычек плотин. Производить работы по замене ремонтных ворот шлюза под защитой грунтовой перемычки возможно только с соблюдением требований нормативно-технической документации и проведением необходимых расчетов.

Ключевые слова: фильтрационная устойчивость, конструктивно-технологические решения, перемычки, временные гидротехнические сооружения, сопряжения с грунтовым основанием

V.S. FEDOROV¹, N.V. KUPCHIKOVA^{1,2}, S.S. REKUNOV³, I.V. FEDOSYUK⁴¹The Russian University of Transport (RUT (MIIT), Moscow, Russia²«Scientific Research and Design Institute of Urban Transport of the city of Moscow», Moscow, Russia³Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia⁴ООО «МКЛ Плюс», Volgograd, Russia

FILTRATION STABILITY OF SOIL BRIDGES OF DAMS AS TEMPORARY HYDRAULIC STRUCTURES

Abstract. Study of the influence of design and technological solutions for the construction of bulkheads of shipping hydraulic structures on filtration processes and the stability of the embankment of the dam core under operational impacts. The research method is a numerical modeling of the processes and analytical research methods made it possible to obtain the results of the set goal.

As a result of studying the influence of design and technological solutions for the construction of bulkheads, as temporary shipping hydraulic structures, on filtration processes and the stability of the embankment of the dam core under operational impacts, the following were completed: analysis of design and technological solutions for the construction of bulkheads of shipping hydraulic structures; analysis of the methods of blocking the river bed, as processes of gradual compression of the flow until the appearance of flow velocities that wash away the river bed and the backfill material. Criteria were identified that ensure the filtration strength of the soil for backfilling the core of the earth dam. A study was conducted of the potential destruction of the bulkhead when calculating for the main combination of loads using numerical modeling. Analysis of the filtration stability of the bulkhead using the finite element method under dynamic impacts has been carried out. Proposals have been developed to prevent the accumulation of filtered water through the bulkhead body. The filtration stability of the soil bulkhead as a temporary hydraulic structure is ensured by the current pressure gradient at the contact of two soils, which is significantly less than the permissible gradient, i.e., there is no erosion. The obtained results of numerical modeling allow us to observe a more accurate mechanism for the destruction of dam bulkheads. It is possible to carry out work on replacing the repair gates of the sluice under the protection of the soil bulkhead only in compliance with the requirements of regulatory and technical documentation and performing the necessary calculations.

Keywords: *filtration stability, structural and technological solutions, bridges, temporary hydraulic structures, interfaces with the soil base.*

Введение

В целях обеспечения надежной и безаварийной работы гидротехнических сооружений и обеспечения безопасности судоходства на внутренних водных путях проводятся мероприятия по их реконструкции и капитальному ремонту [1]. В Российской Федерации расположено более 350-ти судоходных гидротехнических сооружений (далее по тексту – СГТС), отнесенных к критически важным объектам Российской Федерации, которые подлежат декларированию безопасности в соответствии с Федеральным законом от 21 июля 1997 года № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» [2].

Одним из них является судоходный шлюз – гидротехническое водоподпорное сооружение, разделяющее два водоема с разными уровнями воды [3].

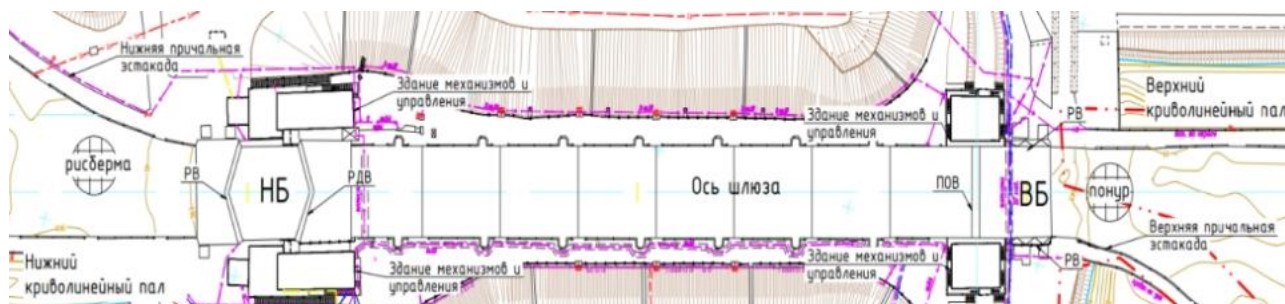


Рисунок 1 – Общий вид судоходного шлюза

НБ - нижний бьеф, ВБ - верхний бьеф, РДВ - рабочие двустворчатые ворота, ПОВ - подъемно-опускные ворота, РВ - ремонтные ворота

Для замены рабочих двустворчатых ворот (нижний бьеф) и подъемно-опускных ворот (верхний бьеф) предусмотрены ремонтные ворота, на некоторых гидротехнических сооружениях предусматриваются аварийно-ремонтные ворота. При длительной эксплуатации шлюза, а также попеременного воздействия различных атмосферных условий (водной и воздушной) на металлических конструкциях появляется коррозионный износ [4].

Проведение работ по замене ремонтных заграждений один из самых трудоемких, поскольку для их замены необходимо производить осушение места производства работ. Производить работы с помощью водолазного расчета, считается не целесообразным с точки зрения трудозатрат и экономической составляющей, т.к. работы должны проводиться в

межнавигационный период, для возможности работы шлюза в обычном режиме для обеспечения судопропуска, с чем связано зимнее удорожание, а также сложности в подводных сварочных и бетонных работах. Для осушения места работ необходимо произвести перекрытие русла реки – это строительный процесс, при котором бытовое русло перегораживается полностью [10].

Перекрытие русла реки осуществляется с помощью перемычек. Перемычки являются временными гидротехническими сооружениями, как правило IV класса, предназначенными для отгораживания части русла реки и создания котлованов и производства работ насухо [10].

Перемычки бывают следующих видов [11]: грунтовые (земляные, каменно-земляные, каменно-набросные), деревянные ряжевые с широкой и узкой ряжевой сквозной рубкой, шпунтовые, ячеистые цилиндрические и сегментные, бетонные. Практический опыт показывает, что наиболее оптимальный способ осушения места проведения работ – это отсыпка места производства работ песчаной (грунтовой) перемычкой.

Цель исследования - изучение влияния конструктивно-технологических решений устройства перемычек СГТС на фильтрационные процессы и устойчивость насыпи ядра плотины при эксплуатационных воздействиях.

В рамках поставленной цели запланированы к решению следующие задачи:

- анализ конструктивно-технологических решений устройства перемычек СГТС;
- анализ способов перекрытия русла реки, как процессов постепенного обжатия потока до появления скоростей течения, размывающих русло реки и материал отсыпки;
- выявление критериев, обеспечивающих фильтрационную прочность грунта для отсыпки ядра грунтовой плотины;
- исследование потенциального разрушения перемычки при расчете на основное сочетание нагрузок с помощью численного моделирования;
- анализ фильтрации перемычки методом конечных элементов при динамических воздействиях;
- разработка предложений для исключения скопления профильтровавшейся воды через тело перемычки.

Рассмотрим конструктивно-технологические решения при расположении грунтовой перемычки в верхнем бьефе гидроузла рядом с понуром (рис. 2), который является водонепроницаемым покрытием, частью флютбета, создаваемым в верхнем бьефе для удлинения пути фильтрации грунтовых вод и предохранения от размыва поверхностным потоком ложа реки, примыкающего к гидротехническому сооружению [12].

При помощи перемычек осуществляется направление речного потока при пропуске строительных расходов и создаются условия для осушения котлованов и возведения сооружений гидроузлов насухо и для речного гидротехнического строительства перемычки являются одним из необходимых элементов схемы пропуска строительных расходов [10]. Как напорные сооружения перемычки являются плотинами и к ним предъявляются соответствующие требования с точки зрения устойчивости, прочности, водопроницаемости и защиты от воздействия потока воды. Как временные сооружения перемычки относятся к IV классу капитальности с соответствующим снижением коэффициентов запаса и максимальным облегчением, и удешевлением конструкций при применении местных строительных материалов.

Работы по устройству перемычек должны производиться в межнавигационный период, т.к. в указанный период, уровень воды в бьефах гораздо ниже и отсутствует судопропуск на гидротехнических сооружениях, что позволяет произвести работы без остановки шлюзований.

Уровень перемычки должен быть минимум на 0,5 м выше максимального уровня воды в бьефе (сухой запас). Перекрытие русла реки речного гидроузла является одним из сложных

этапов работ по общей схеме пропуска строительных расходов. Сущность перекрытия заключается в постепенном или мгновенном завале русла различными строительными материалами (песчано-гравелистой смесью, горной массой, сортировочным камнем, специальными кубами и др.) [8].

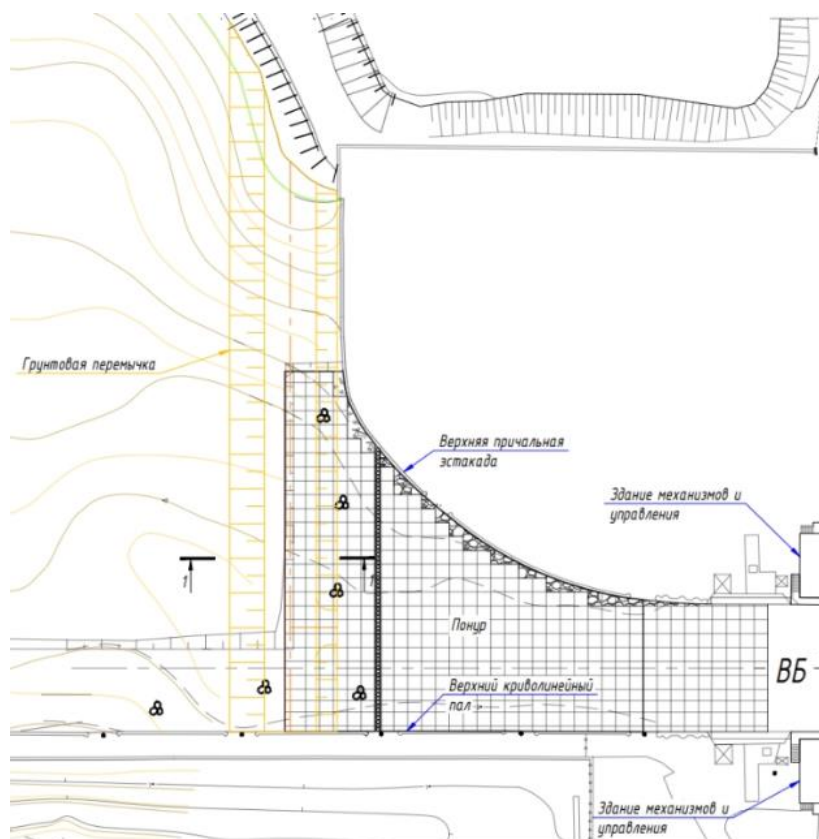


Рисунок 2 – Расположение перемычки вблизи понура на верхнем бьефе (ВБ – верхний бьеф)

Фильтрационная прочность ядра грунтовой плотины

Ядро грунтовой плотины является главным противофильтрационным элементом плотины. Именно ядро обеспечивает предотвращение проникновения воды, фильтрующейся в теле плотины [12].

Структура ядра не должна быть повреждена при всех фильтрационных процессах, которые будут действовать в период ее эксплуатации, поэтому важнейшим показателем является фильтрационная прочность материала ядра [12].

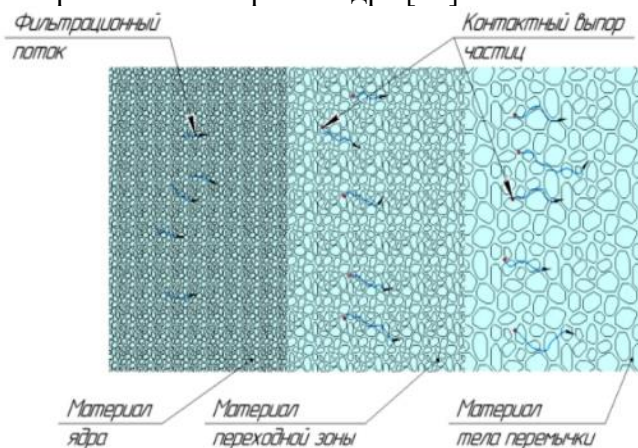


Рисунок 3 – Фильтрационная прочность ядра

При проектировании ядра грунтовой перемычки учитываются различные критерии, обеспечивающие фильтрационную прочность грунта, из которого отсыпается ядро грунтовой плотины.

Сопряжение перемычки с основанием подходного канала

От типа сопряжения перемычки и основания зависит фильтрационная устойчивость. Выбор неоптимальной конструкции сопряжения может привести к развитию фильтрационных процессов, и как следствие к её размыву. При выборе типа сопряжения перемычки с основанием наиболее важным фактором служит определения типа основания - скальное или нескальное (податливые русловые отложения).

Существует 5 основных способов сопряжения грунтовых перемычек с основанием [10]:

1.глиняный зуб в открытом котловане на водоупоре. Данное сопряжение применимо при наличии русловых отложений малой мощности (до 3-3,5 м), подстилаемых водоупором (рис. 4, б);

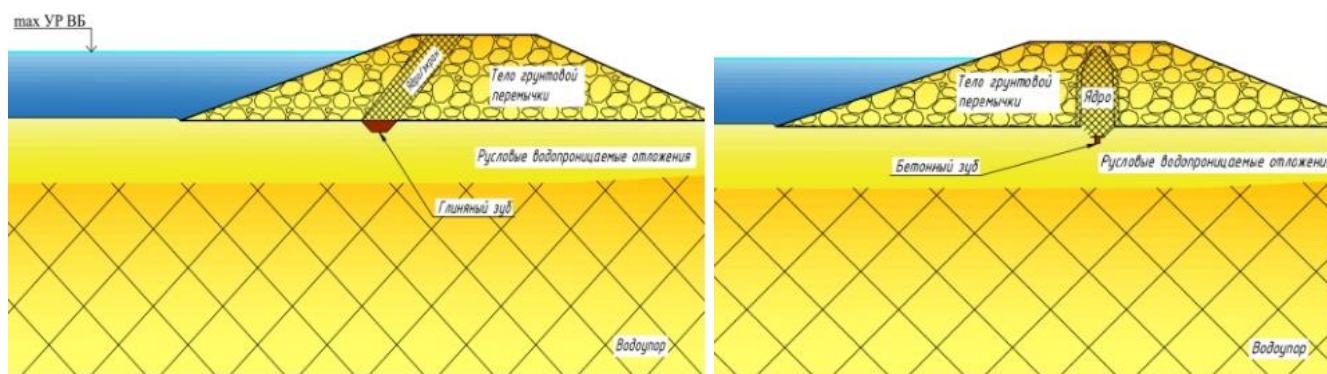


Рисунок 4 – Сопряжение перемычки с основанием с использованием: а - бетонного зуба; б - глиняного зуба

2.бетонный зуб в открытом котловане на водоупоре. Данное сопряжение применимо при наличии русловых отложений средней мощности (от 3,5 м до 20 м), подстилаемых водоупором (рис. 4, а);

3.цементационная завеса. Данная конструкция применяется, когда основание - скальное, и поверх него полностью отсутствуют мягкие отложения (рис.5, а);

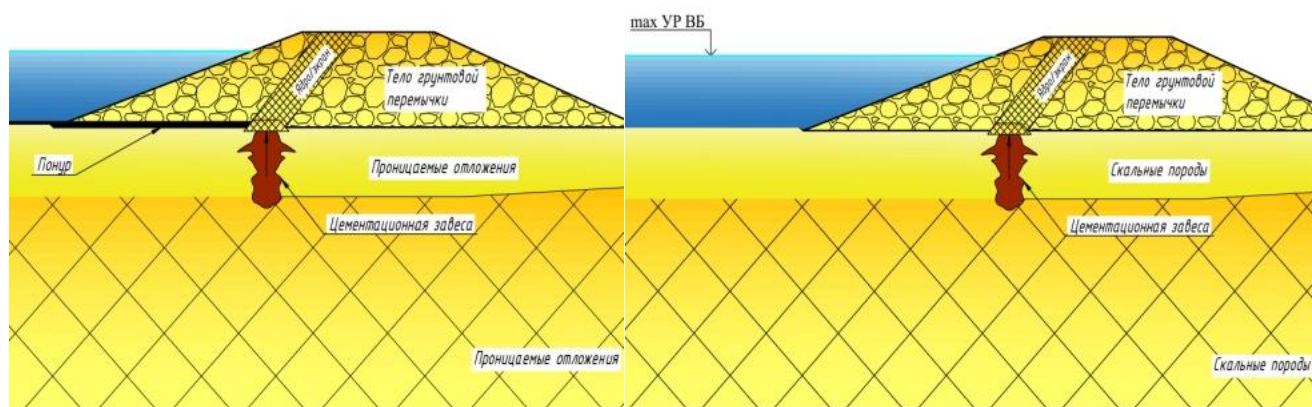


Рисунок 5 - Сопряжение перемычки с основанием с использованием: а - цементационной завесы; б – понура с цементационной завесой

4.понур с цементационной завесой. Данная конструкция применяется, если основание представлено проницаемыми отложениями очень большой мощности (т.е. водоупор

практически недостижим), и при этом основание допускает устройство цементационной завесы (рис.5, 6);

5.понур и развитый дренаж по подошве плотины. Данная конструкция применяется, если основание представлено проницаемыми отложениями очень большой мощности (т.е. водопор практически недостижим) и не допускает выполнение цементационной завесы.

Наиболее эффективная (с точки зрения экономической рентабельности и простоты производства строительных работ) перемычка поперек судоходного канала с глиняным зубом (1-й способ).

Силы, удерживающие грунты от размыва – это силы трения ($\text{tg } \varphi$), зацепления, пригрузки грунтом и геометрическое соотношение размера частиц и размера пор контактируемых грунтов [15].

При перекрытии прорана грунтовой перемычкой отсыпкой, увеличивается перепад уровня воды, поэтому для отсыпки на разных стадиях перекрытия должен в принципе применяться материал разной крупности. Однако на практике зарекомендовали себя к применению применяют два вида материалов. На начальном этапе применяется песок фр. 0,1-0,2, а на заключительном – крупный камень (негабариты) [16]. В качестве защитного экрана должна применяться геомембрана, соответствующая п. 4.20 СП 39.13330.2012. Уклон мокрого откоса принимается 1:4, а сухого – 1:3 [11].

Для проезда строительной техники к месту производства работ, поверх перемычки укладываются автодорожные плиты (рис. 6).

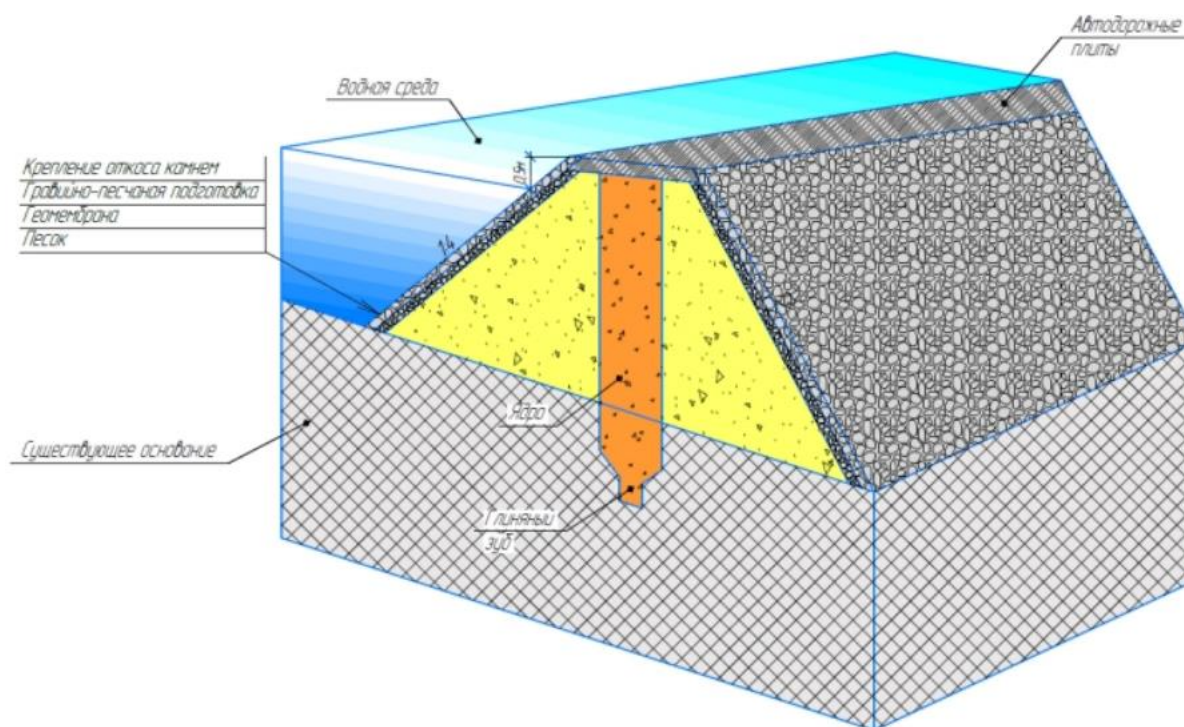


Рисунок 6 – Устройство грунтовой перемычки

При проведении работ по устройству перемычки необходимо проводить геотехнический контроль за состоянием тела и основания ее, в соответствии с требованиями п. 4.18 СП 39.13330.2012.

Модели и методы

Расчет устойчивости откосов перемычки выполняется на основное и особое сочетание нагрузок. Нахождение коэффициента устойчивости откоса производится в ходе нелинейного упругопластического расчета методом конечных элементов (МКЭ) с использованием метода снижения прочностных характеристик (SRM), что соответствует пункту 9.10 СП 39.13330.2012.

Расчет грунтовой перемычки производится на максимально возможный уровень воды в зимний период. Численное моделирование возможно выполнять в следующих программных комплексах: Plaxis; Geo5; Sio 2D; Midas GTS NX; Adonis и т.д.

Численное моделирование было выполнено в лицензионном программном комплексе ADONIS и Plaxis.

ADONIS – это программа, применяемая для линейного и нелинейного анализа геотехнических задач. Она имеет полный графический пользовательский интерфейс (GUI) для предварительной или постобработки и использует полностью автоматический генератор сеток для создания сложных сеток с конечными элементами [17].

PLAXIS – сертифицированная и верифицированная программа для решения геотехнических задач методом конечных элементов. Программа разработана на основе мирового опыта исследовательских институтов в области механики грунтов и численного моделирования в геотехнике [18].

Для моделирования поведения грунтов используется упругопластическая модель Кулона-Мора [19, 20].

Граничные условия задаются путем фиксации боковых границ расчетной модели от горизонтальных, а нижней – от горизонтальных и вертикальных перемещений. Ширина и глубина расчетной области задается таким образом, чтобы не влиять на результаты расчета. Кроме опорных граничных условий, задаются гидрогеологические граничные условия: уровень вод, фильтрационные характеристики грунтов, проницаемость строительных материалов.

Расчетная область разбивается на конечные элементы (КЭ) высокого порядка. Используется тип КЭ – «3/6-узловой Гаусс». Применяется адаптивная конечно-элементная сетка, параметры которой автоматически уточняются на каждом расчетном шаге. Адаптивная сетка предполагает анализ сходимости, когда конечно-элементная сетка постепенно измельчается до тех пор, пока не будет обнаружено, что некоторые ключевые характеристики (перемещения, напряжения и т. д.) достигают устойчивых значений.

Взаимодействие различных слоев между собой происходит через интерфейсные элементы, которые позволяют учитывать характер контакта между конструкцией и грунтом. Параметры контактных элементов назначаются в соответствии с таблицей 9.1 СП 22.13330.2016.

Учет сейсмического воздействия производится в соответствии с пунктом 6.15 СП 358.1325800.2017, т.е. используется расчет по статической теории, который предполагает, что значения сейсмических нагрузок определяются произведением массы конструкции (или рассматриваемого объема грунта) на абсолютное ускорение этой конструкции (или указанного объема грунта).

В рамках квазистатической задачи предполагается, что вызванные землетрясением силы представляются в виде сил инерции, приложенных статически. При использовании квазистатической расчетной схемы ускорение грунта принимается как горизонтально направленным, так и с наклоном вектора сейсмического воздействия к горизонтальной плоскости под углом 30°.

В расчетах на сейсмическое воздействие используются динамические характеристики грунта. В зависимости от расчетного случая учитываются фильтрационные силы,

соответствующие ситуации «неустановившейся фильтрации» или «установившейся фильтрации».

Влияние воды, насыщающей откос, учитывается следующим образом - к насыщенному водой объему грунта элемента прикладываются фильтрационные силы, определяемые в ходе расчета. В расчетах учитывается нагрузка от транспорта величиной 20 кПа.

Грунтовая перемычка располагается на следующем основании (слои указаны сверху вниз):

1. техногенные отложения (насыпные грунты):

- пески крупные серовато-буровато-желтые с гравием и галькой средней плотности и плотные с кусками кирпича и бетона в кровле, неоднородные;
- пески мелкие бурые, слабоглинистые с включениями единого гравия и гальки, от рыхлых до плотных, неоднородные;

2. голоценовые аллювиальные отложения:

- русловые отложения современного аллювия молодой поймы, пески зеленовато и желтовато-серые различной крупности, гравийные грунты с песчаным заполнителем;
- старинные отложения современного аллювия: глины темно-серой окраски с растительными остатками, консистенция тугопластичная и мягкопластичная.

Результаты исследования и их анализ

Общий вид расчетной схемы представлен на рис. 7 и 8. Результаты расчетов устойчивости для наиболее опасных расчетных случаев представлены на рис. 9-13.

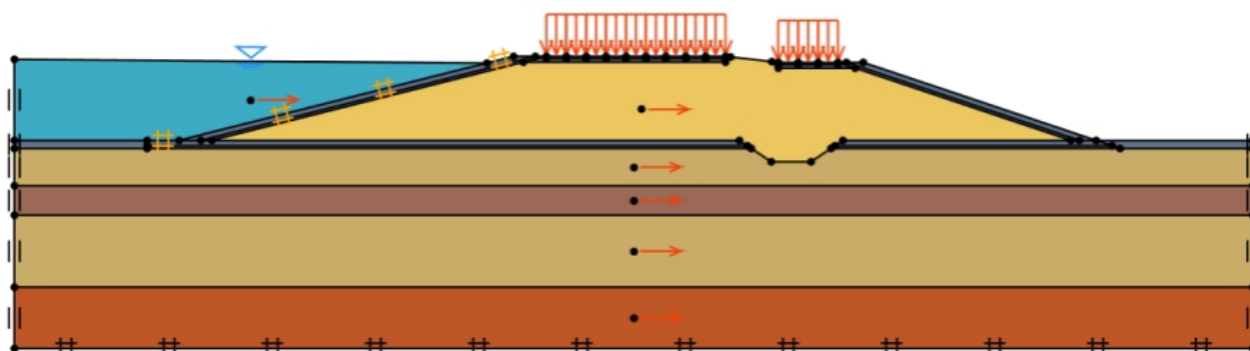


Рисунок 7 – Общий вид расчетной схемы для анализа устойчивости откосов перемычки методом конечных элементов (см. рис. 4, сечение 1-1) в программном комплексе Adonis

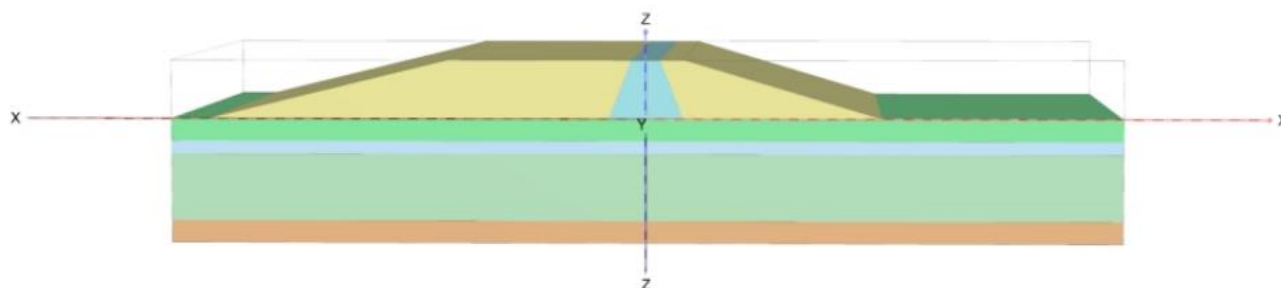


Рисунок 8 - Общий вид расчетной схемы для анализа устойчивости откосов перемычки методом конечных элементов в программном комплексе Plaxis

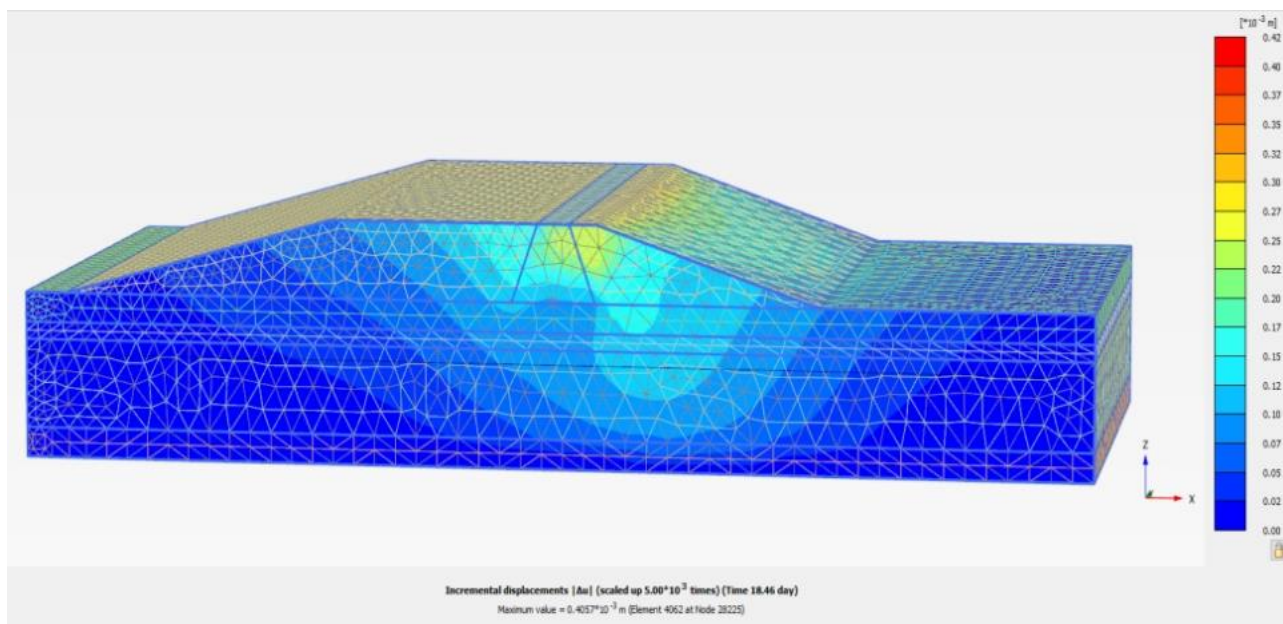


Рисунок 9 - Схема потенциальных перемещений в теле грунтовой перемычки (см. рис. 4, сечение 1-1) в программном комплексе Plaxis (позволяет наблюдать механизм разрушения)

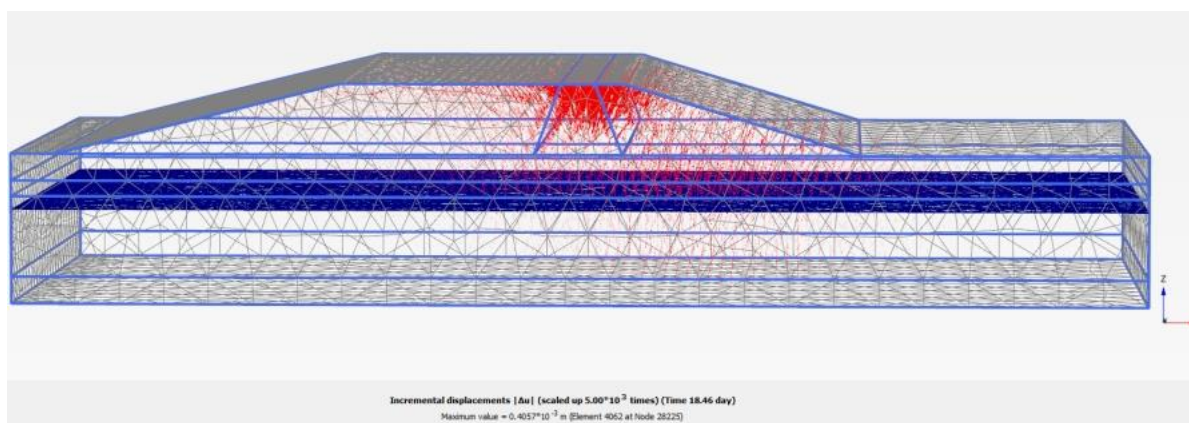


Рисунок 10 - Представление полученных результатов на рисунке 13 с помощью «стрелок» позволяют наблюдать более точный механизм разрушения

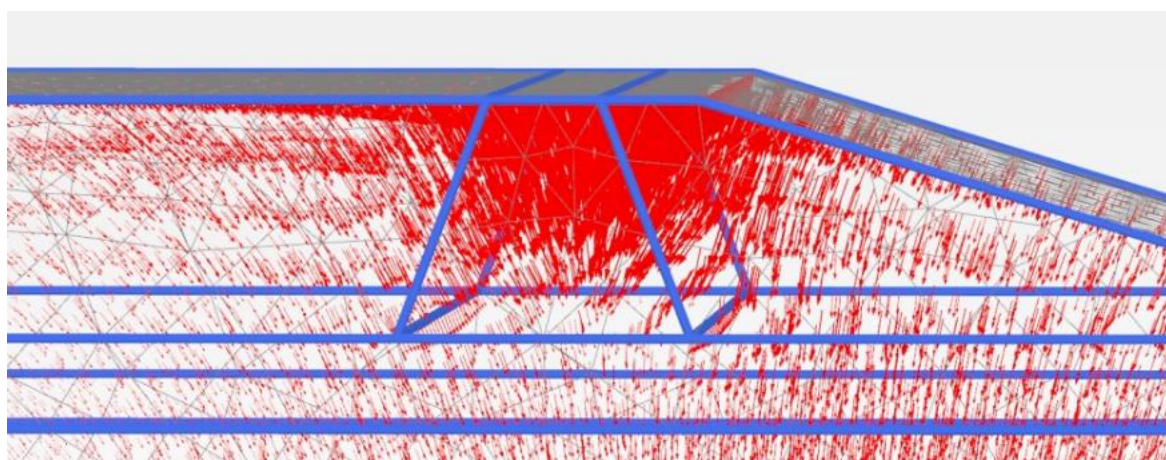


Рисунок 11 - Фрагмент разрушения ядра грунтовой перемычки

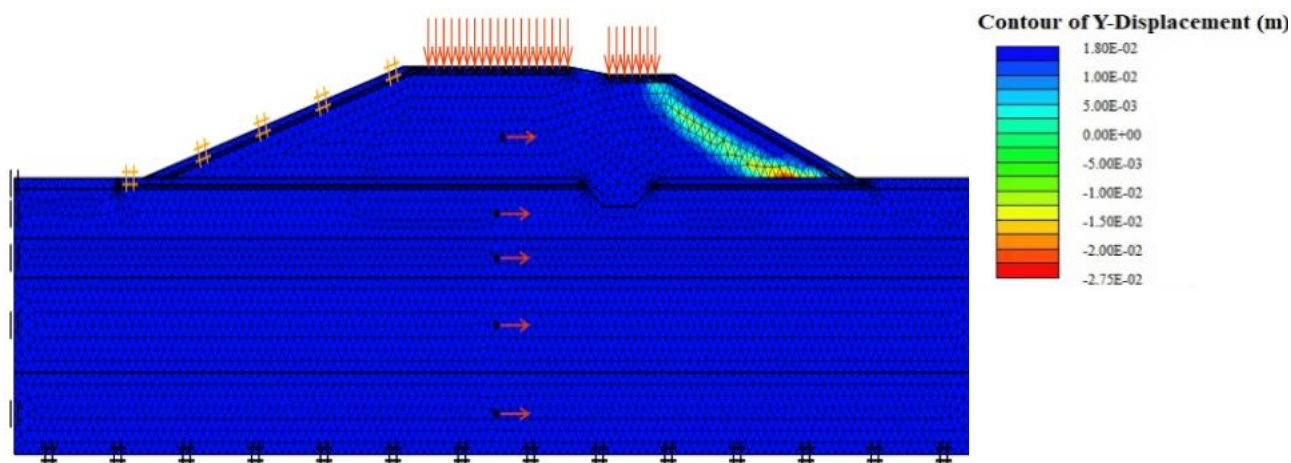


Рисунок 12 - Схема потенциального разрушения перемычки при действии сейсмических нагрузок и при максимальном уровне воды в программном комплексе Adonis. Коэффициент запаса по устойчивости – 1,26

Критерием обеспечения устойчивости (несущей способности) системы «Сооружение-основание» по СП 23.13330.2018 является выполнение условия:

где F и R – расчетные значения соответственно обобщенных сдвигающих сил и сил предельного сопротивления или моментов сил, стремящихся сдвинуть (повернуть) и удержать систему «сооружение-основание» или склон;

γ_c – коэффициент сочетания нагрузок, принимаемый равный 1,00 при основном сочетании нагрузок;

γ_n – коэффициент надежности по ответственности сооружения, принимаемый равным 1,20 для сооружений II класса;

γ_c – коэффициент условия работы, учитывающий тип сооружения, принимаемый равным 1,00.

Предлагаемый вариант перемычки обеспечивает запас устойчивости при действии сейсмических нагрузках: $1,26 > 1,20$.

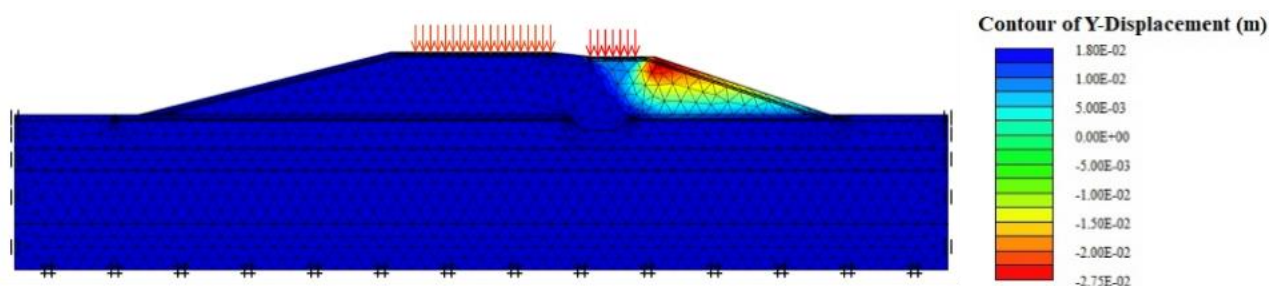


Рисунок 13 - Схема потенциального разрушения перемычки при расчете на основное сочетание нагрузок (см. рис. 4, сечение 1-1) в программном комплексе Adonis. Коэффициент запаса по устойчивости – 1,58

Предлагаемый вариант перемычки обеспечивает запас устойчивости при основном сочетании нагрузок: $1,58 > 1,20$.

Фильтрационный расчет перемычки

Фильтрационный расчет перемычки выполняется в соответствии с пунктом 9.4 СП 39.13330.2012. Фильтрационный расчет выполняется в двухмерной постановке методом конечных элементов. Результаты расчетов представлены на рис. 19, 21.

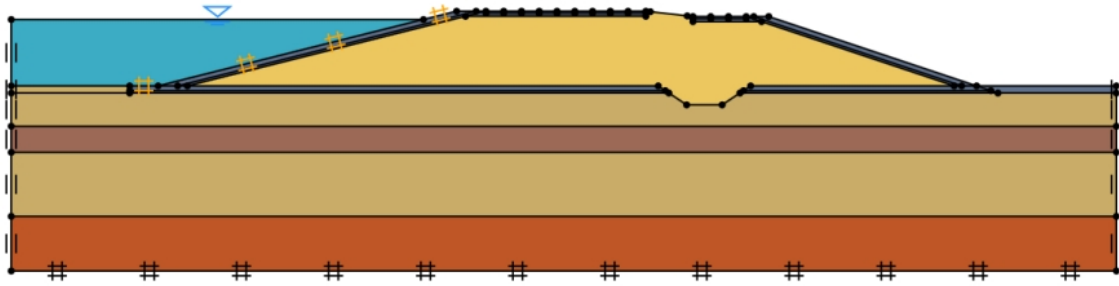


Рисунок 14 - Расчетная схема к анализу фильтрации перемычки методом конечных элементов (см. рис. 4, сечение 1-1) в программном комплексе Adonis

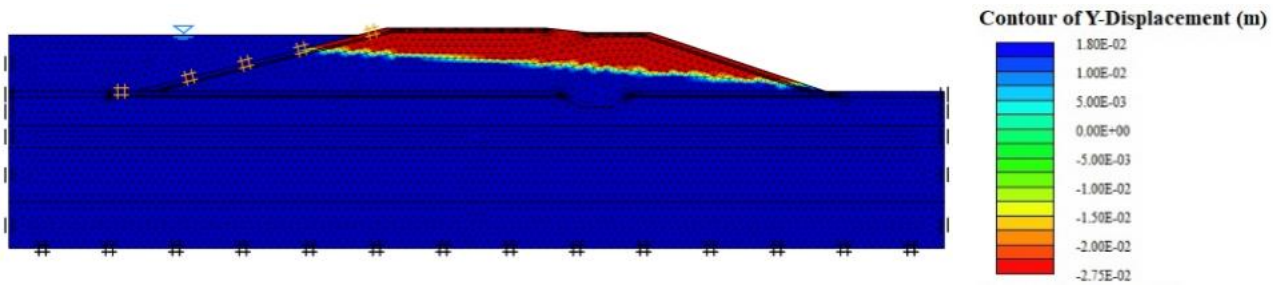


Рисунок 15 - Положение депрессионной поверхности в теле перемычки (см. рис. 4, сечение 1-1) в программном комплексе Adonis

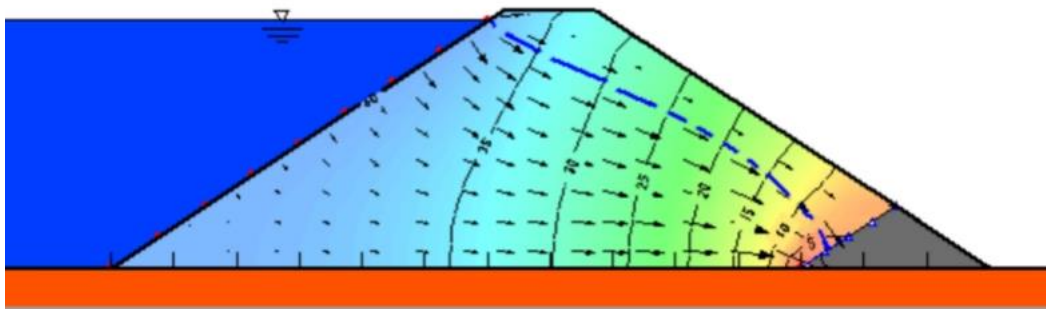


Рисунок 16 - Схема потока воды внутри перемычки

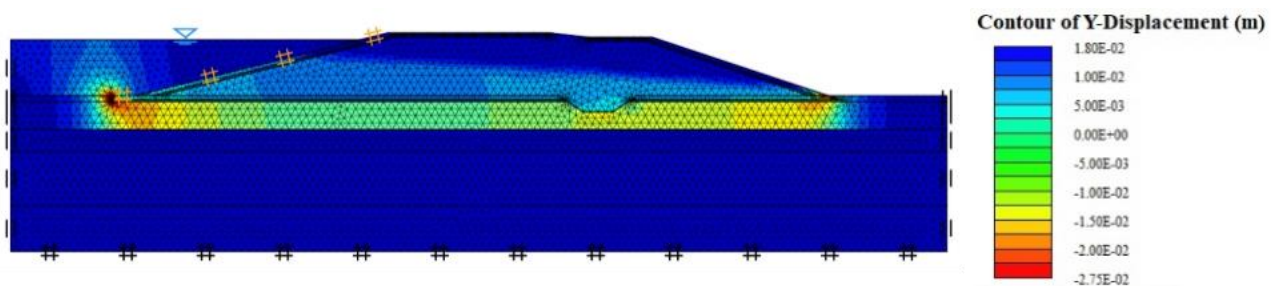


Рисунок 17 - Распределение потока в теле перемычки и в основании (см. рис. 4, сечение 1-1) в программном комплексе Adonis

Согласно рис. 17, депрессионная поверхность в теле перемычки не гасится к ее окончанию, это вызвано тем, что расчет производился на максимально-возможный уровень воды в верхнем бьефе в случае аварийных ситуаций на водохранилище или иных, рядом расположенных гидроузлах. Производить увеличение перемычки не целесообразно с экономической точки зрения, т.к. согласно рис. 14 и 15, она обладает достаточным коэффициентом устойчивости.

Для исключения скопления профильтровавшейся воды через тело перемычки необходимо предусматривать горизонтальный дренаж [11].

Определение критических градиентов контактного размыва и проверка на отсутствие контактного размыва по подошве перемычки

Критический градиент размыва на контакте грунтов определяется по следующей формуле СП:

$$I_{кр.конт.} = \frac{1,35}{\sqrt{D_0^{max}}} = 1 \quad (2)$$

где D_0^{max} – максимальный диаметр фильтрационных пор крупнозернистого грунта.

$$D_0^{max} = \kappa \cdot D_0 = 1,5 \cdot 0,05 = 0,008 \text{ см} \quad (3)$$

κ – коэффициент неравномерности раскладки частиц в грунте, величина κ составляет: для грунтов с коэффициентом разнородности $\eta \leq 25$:

$$\kappa = 1 + 0,05 \cdot \eta = 1 + 0,05 \cdot 10 = 1,5 \quad (4)$$

где η – коэффициент разнородности грунта, принимаемый 10:

$$D_0 = 0,46 \cdot \sqrt[6]{\eta} \cdot \frac{n}{1-n} \cdot d_{17} = 0,46 \cdot \sqrt[6]{10} \cdot \frac{0,33}{1-0,33} \cdot 0,14 = 0,05 \text{ мм} \quad (5)$$

где D_0 – средний диаметр фильтрационных пор крупнозернистого грунта;

n – пористость (в долях единицы), принимаемая 0,33;

d_{17} – размеры частиц основания, меньше которых содержится 17% частиц по массе, принимаемые 0,14.

$$l_{кр.конт.} = \frac{1,35}{\sqrt{0,008}} - 1 = 14,17$$

Отсутствие размыва по подошве перемычки обеспечивается при условии:

$$l_{д.конт.} \leq \frac{1}{\gamma_n} \cdot l_{кр.конт.} \quad (6)$$

$$0,5 \leq \frac{1}{1,1} \cdot 14,17 = 12,9$$

Действующий градиент напора на контакте двух грунтов значительно меньше допустимого градиента, т.е. размыв отсутствует.

Проверка устойчивости грунта на низовом откосе.

Грунт в области выхода кривой депрессии на откос считается устойчивым, если удовлетворяется условие [24]:

$$m_H = 3 > \frac{2}{tg\varphi_T} = \frac{2}{tg31^\circ} = 3,3 \quad (7)$$

где φ_T – угол внутреннего трения грунта тела плотины.

Поскольку условие устойчивости не выполняется, низовой «сухой» откос в пределах заклинивания на него кривой депрессии покрывается слоем водопроницаемой пригрузки - наклонный дренаж.

Выпор грунта при выходе фильтрационного потока в сторону «сухого» откоса

Выпор грунта может появиться за пределами подземного контура сооружения, при выходе фильтрационного потока в сторону «сухого» откоса, где должен располагаться дренаж, выполняющий одновременно и роль пригрузки грунта основания.

Проверку грунта на выпор в области «сухого» откоса следует выполнять при условии, если максимальный выходной градиент напора со стороны «сухого» откоса:

$$I_{\text{ВЫХ}} > 0,60 - 0,70 \quad (8)$$

При максимальном значении выходного градиента напора в сторону «сухого» откоса:

$$I_{\text{ВЫХ}}^{\text{МАКС}} \geq I_{\text{КР}}^{\text{В}} \quad (9)$$

где $I_{\text{КР}}^{\text{В}}$ – критический градиент выпора для данного грунта основания, величина которого определяется по формуле, при отсутствии пригрузки в месте выхода фильтрационного потока для мелкозернистых песчаных грунтов:

$$I_{\text{КР}}^{\text{В}} = \left(\frac{\Delta}{\gamma_{\text{В}}} - 1 \right) \cdot (1 - n) \cdot \alpha \quad (10)$$

где Δ – удельный вес частиц грунта;

$\gamma_{\text{В}}$ – объемный вес воды;

n – пористость грунта в долях единицы;

α – поправочный коэффициент (0,90-0,95).

$$\Delta = \rho \cdot g = 1,7 \cdot 9,81 = 16,68 \text{ кН/м}^3 \quad (11)$$

где ρ – плотность грунта;

g – ускорение силы тяжести (9,81 м/с²).

Пористость грунта определяется по формуле:

$$n = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s} = \frac{1,7 - 1,2}{1,7} = 0,5 \quad (12)$$

где ρ_s – плотность частиц грунта;

ρ_d – плотность сухого грунта.

$$I_{\text{КР}}^{\text{В}} = \left(\frac{16,68}{9,8} - 1 \right) \cdot (1 - 0,5) \cdot 0,9 = 0,32$$

В виду того, что:

$$I_{кр}^B(0,32) < I_{вых}(0,6)$$

выпор грунта отсутствует.

Учет осадки при расчете высоты плотины

При назначении проектной отметки гребня осадка перемычки и ее основания в эксплуатационный период не учитывается. В связи с этим отметка гребня сооружения в момент окончания строительства должна превышать проектную на ожидаемую эксплуатационную осадку.

Для приближенной оценки вертикальных деформаций гребня грунтовой дамбы используются эмпирические зависимости.

Размер конечной (стабилизированной) осадки гребня S_c и ее распределение во времени определяется по эмпирическим формулам [28]:

$$S_c = -0,453 \cdot (1 - \exp(0,08 \cdot H_{пл})) = -0,453 \cdot (1 - \exp(0,09 \cdot 0,06)) = 0,002 \text{ м} \quad (13)$$

$$S_t = S_c \cdot \exp(-0,693 \cdot t^{-1,157}) = 0,002 \cdot \exp(-0,693 \cdot 10^{-1,157}) = 0,0019 \text{ м} \quad (14)$$

где $H_{пл}$ – высота плотины;

t – продолжительность осадки, лет.

Для предварительных расчетов ориентировочно запас на осадку тела перемычки принимается: для плотин высотой до 10...15 м из песчаных грунтов – $0,01 \cdot H_{пл}$.

Запас на осадку основания S_c принимают: для низких плотин на плотных песчаных или суглинистых грунтах мощностью более $0,25 H_{пл}$ – $(0,01-0,02) H_{пл}$.

Нестабильную осадку основания определяют по эмпирической формуле:

$$S_t = S_c \cdot (1 - 2,7^{-0,5t}) = 0,002 \cdot (1 - 2,7^{-5}) = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (15)$$

где S_t – осадка за время от начала приложения нагрузки;

S_c – стабилизированная осадка.

Выводы

1. Фильтрационная устойчивость грунтовой перемычки, как временного гидротехнического сооружения обеспечивается, по действующему градиенту напора на контакте двух грунтов значительно меньше допустимого градиента, т.е. размыв отсутствует.

2. Представленные полученные результаты на рисунке 13 с помощью «стрелок» позволяют наблюдать более точный механизм разрушения перемычек плотин. Производить работы по замене ремонтных ворот шлюза под защитой грунтовой перемычки возможно только с соблюдением требований нормативно-технической документации и проведением необходимых расчетов. После проведения строительно-монтажных работ, грунтовая перемычка демонтируется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. URL: https://morflot.gov.ru/devatelnost/napravleniya/devatelnosti/rechnoy_flot/vvt/sudohodnyie_gidrotehnicheskie_sooruzeniya/?ysclid=1qiehl5a647160453 (дата посещения 22.12.2023 г.).
2. Федеральный закон от 27.07.1997 г. № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» // Собрание законодательства РФ. – 28.07.1997. – № 30. – Ст. 3589.
3. Колосов М. А. Диагностика состояния камеры шлюза по степени гашения напора на верхней голове // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2014. – № 2 (83). – С. 83-86.
4. Соколова Ю. А. Причины атмосферной коррозии металлоконструкций и методы защиты // Иновации и инвестиции. – 2017. № 8. – С. 157-160.
5. МУ 050-025-2001. Методические указания. Определения технического состояния металлоконструкций ворот и затворов СГТС. – М.: ФГУП ЦБНТИМТ РФ, 2002. – 86 с.

6. Кульмицкий М.Л. Расчетные исследования влияния коррозионного износа на прочность металлоконструкций ворот и затворов шлюзов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2016. - № 1 (35). – С. 60-66.
7. Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» // Собрание законодательства РФ. – 04.01.2010. - № 1. – Ст. 5.
8. Лапин Г. Г. Организация гидротехнического строительства: практическое пособие для проектировщиков, строителей и студентов вуза // . – Москва, 2021. – 189 с. – ISBN 978-56044903-1-0.
9. Телешев В. И. Организация, планирование и управление гидротехническим строительством // В. И. Телешев. – Москва : Стройиздат, 1989. – 416 с.
10. Рассказов Л. Н. Гидротехнические сооружения. Часть 1 / Л. Н. Рассказов, В. Г. Орехов, Н. А. Анискин. – 2-е изд. – Москва : Изд-во Ассоциации строительных вузов: под редакцией Л. Н. Рассказова, 2011. – 575 с.
11. П-885-91. Пособие по технологии возведения плотин из грунтовых материалов к СНиП 2.06.05-84 и СНиП 3.07.01-85" (утв. Всесоюзным ордена Ленина проектно-изыскательским научно-исследовательским объединением "Гидропроект" им. С.Я. Жука 22.02.1991). Введ. 1991-02-22. – М., 1991 – 162 с.
12. Праведный Г. Х. Подготовка скальных оснований плотин из грунтовых материалов / Г. Х. Праведный, В. Г. Радченко – Ленинград : Изд-во Энергия, 1973. – 82 с.
13. Буренкова В. В. Отечественный опыт оценки фильтрационной прочности несвязных грунтов тела плотины и основания // Природообустройство. – 2020. – № 4. – С. 84-91.
14. СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84. Введ. 2013-01-01. – М., 2013 – 58 с.
15. URL: <http://geowizard.org/index.html> (дата посещения 22.12.2023 г.).
16. URL: <https://www.plaxis.ru> (дата посещения 22.12.2023 г.).
17. Baotang Shen, Jingyu Shi, Nick Barton, An approximate nonlinear modified Mohr-Coulomb shear strength criterion with critical state for intact rocks // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2018. Vol. 10.Iss. 4. Pp. 645-652.
18. Hassani, Rahim & Basirat, Rouhollah & Mahmoodian, Navid. Classical Method and Numerical Modeling for De-signing of Sheet Pile Wall (Case Study: Tuti-Bahri Bridge, Sudan). 2016. 10.13140/RG.2.2.10294.91208.
19. П 56-90/ВНИИГ. Рекомендации по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений. С.-Петербург, 1992 – 110 с.
20. ВСН 04-71. Указания по расчету устойчивости земляных откосов. «Энергия», 1971 – 105 с.
21. Чугаев Р.Р. Гидравлика. Л.: Энергоиздат. Ленинградское отделение, 1982. - 672 с.
22. Чугаев Р.Р. Гидротехнические сооружения. Часть 1. Глухие плотины. Агропромиздат, 1985. - 318 с.
23. Чугаев Р.Р. Гидротехнические сооружения. Часть 2. Водосливные плотины. Агропромиздат, 1985. - 302 с.
24. Расчёт водохранилища: водохозяйственное обоснование и определение параметров. Часть II. Расчёт параметров грунтовой плотины: методические указания к выполнению практических работ по курсам «Проектирование водохозяйственных систем», «Водохозяйственные сооружения» и «Инженерные сооружения» для студентов V курса, обучающихся по специальностям 280302 «Комплексное использование и охрана водных ресурсов» и 130302 «Поиски и разведка подземных вод и инженерно-геологические изыскания» / О.Г. Савичев, В.В. Крамаренко. –Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 40с.

REFERENCES

1. URL: https://morflot.gov.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/rechnoy_flot/vvt/sudohodnyie_gidrotehnic_heskie_sooruzheniya/?ysclid=lqiehilt5a647160453 (date of visit 12/22/2023).
2. Federal Law of 07/27/1997 No. 117-FZ "On the Safety of Hydraulic Structures" // Collected Legislation of the Russian Federation. - 07/28/1997. - No. 30. - Art. 3589.
3. Kolosov, M. A. Diagnostics of the lock chamber condition by the degree of pressure damping on the upper head. *Bulletin of the Admiral*. – 2014. - No. 2 (83). – Pp. 83-86.
4. Sokolova, Yu. A. Causes of atmospheric corrosion of metal structures and methods of protection *Innovations and investments*. – 2017. No. 8. – Pp. 157-160.
5. MU 050-025-2001. Methodical instructions. Definitions of the technical condition of metal structures of gates and valves of the SGTS. – М.: FSUE TsBNTIMT RF, 2002. – 86 p.
6. Kulmitsky, M.L. Calculation studies of the effect of corrosive wear on the strength of metal structures of gates and valves of locks. *Bulletin of the Admiral*. – 2016. - No. 1 (35). – Pp. 60-66.

7. Federal Law of 30.12.2009 No. 384-FZ "Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures". *Collection of Legislation of the Russian Federation*. – 04.01.2010. - No. 1. – Art. 5.
8. Lapin, G. G. Organization of hydraulic engineering construction: a practical guide for designers, builders and university students. – Moscow, 2021. – 189 p. – ISBN 978-56044903-1-0.
9. Teleshev, V. I. Organization, planning and management of hydraulic engineering construction. – Moscow: Stroyizdat, 1989. – 416 p.
10. Rasskazov, L. N. Hydraulic engineering structures. Part 1 - 2nd ed. - Moscow: Publishing house of the Association of construction universities: edited by L. N. Rasskazov, 2011. - 575 p.
11. P-885-91. Manual on the technology of construction of dams from earth materials to SNiP 2.06.05-84 and SNiP 3.07.01-85" (approved. All-Union Order of Lenin Design and Survey Research Association "Gidroproekt" named after S. Ya. Zhuk on 22.02.1991). Introduced. 1991-02-22. - M., 1991 - 162 p.
12. Pravedny, G. Kh. Preparation of rocky foundations of dams from earth materials - Leningrad: Energia Publishing House, 1973. - 82 p.
13. Burenkova, V. V. Domestic experience in assessing the filtration strength of non-cohesive soils of the dam body and foundation. *Nature management*. - 2020. – No. 4. – P. 84-91.
14. SP 39.13330.2012. Dams made of earth materials. Updated version of SNiP 2.06.05-84. Introduced 2013-01-01. – M., 2013 – 58 p.
15. URL: <http://geowizard.org/index.html> (date of visit 12/22/2023).
16. URL: <https://www.plaxis.ru> (date of visit 12/22/2023).
17. Baotang Shen, Jingyu Shi, Nick Barton, An approximate nonlinear modified Mohr-Coulomb shear strength criterion with critical state for intact rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2018. Vol. 10.Iss. 4. pp. 645-652.
18. Hassani, Rahim & Basirat, Rouhollah & Mahmoodian, Navid. Classical Method and Numerical Modeling for De-signing of Sheet Pile Wall (Case Study: Tuti-Bahri Bridge, Sudan). 2016. 10.13140/RG.2.2.10294.91208.
19. P 56-90/VNIIG. Recommendations for the design of reverse filters of hydraulic structures. S.-Peretrub, 1992 – 110 p.
20. VSN 04-71. Guidelines for calculating the stability of earth slopes. "Energy", 1971 – 105 p.
21. Chugaev R.R. Hydraulics. L.: Energoizdat. Leningrad Branch, 1982. - 672 p.
22. Chugaev R.R. Hydraulic structures. Part 1. Blind dams. Agropromizdat, 1985. - 318 p.
23. Chugaev R.R. Hydraulic structures. Part 2. Spillway dams. Agropromizdat, 1985. - 302 p.
24. Reservoir calculation: water management justification and determination of parameters. Part II. Calculation of parameters of an earth dam: guidelines for practical work on the courses "Design of water management systems", "Water management structures" and "Engineering structures" for fifth-year students studying in the specialties 280302 "Complex use and protection of water resources" and 130302 "Prospecting and exploration of groundwater and engineering-geological surveys". - Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2009. - 40 p.

Информация об авторе

Фёдоров Виктор Сергеевич

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (РУТ МИИТ)

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения».

E-mail: fvs_skzs@mail.ru

Купчикова Наталья Викторовна

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (РУТ МИИТ),

старший научный сотрудник ГБУ НИИ «МосТрансПроект»,

E-mail: kupchikova79@mail.ru

Рекунов Сергей Сергеевич

Волгоградский государственный технический университет,

к.т.н., доцент кафедры «Строительная механика»

E-mail: rekunoff@mail.ru

Федосюк Игорь Викторович

ООО «МКЛ Плюс», г. Волгоград,

главный инженер проекта

E-mail: iviktorovich34@mail.ru

Information about author

Fyodorov Viktor S.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport" (RUT MIIT)
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of "Building Structures, Buildings and Facilities".
E-mail: fvs_skzs@mail.ru

Kupchikova Natalya V.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport" (RUT MIIT),
Senior Researcher of the State Budgetary Institution Research Institute "MosTransProekt",
E-mail: kupchikova79@mail.ru

Rekunov Sergey S.

Volgograd State Technical University,
PhD, Associate Professor of the Department of "Structural Mechanics"
E-mail: rekunoff@mail.ru

Fedosyuk Igor V.

ООО "MKL Plus", Volgograd,
Chief Project Engineer
E-mail: iviktorovich34@mail.ru

В.Г. МУРАШКИН¹¹ФГБОУ ВО «СамГТУ», г. Самара, Россия

МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА ПРОШЕДШЕГО ДЛИТЕЛЬНЫЙ СРОК ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация. В процессе длительного срока эксплуатации в бетоне нарушается соответствие между прочностью и начальным модулем деформации, поэтому для расчета эксплуатируемых железобетонных конструкций требуются деформационные кривые, соответствующие происшедшим изменениям. Выражение на основе уравнения Аррениуса позволяет построить модель деформирования бетона на основе экспериментальных данных. Такая модель соответствует установленным критериям. Для подтверждения адекватности полученной модели, представлены результаты сравнения предлагаемой модели с моделью деформирования бетона, заложенной в нормы, для различных классов бетонов. Полученные результаты подтверждают адекватность предложенной деформационной модели

Ключевые слова: диаграмма деформирования бетона, реконструкция, железобетон, относительные деформации.

V.G. MURASHKIN¹¹ Samara State Technical University, Samara, Russia

DEFORMATION MODEL OF CONCRETE AFTER PROLONGED USAGE

Abstract. The relationship between the strength of concrete and tangent modulus gets broken during its prolonged usage, so deformation curves matching the changes that occurred are required for the calculation of reinforced concrete structures. The formula based on the Arrenius equation enables the creation of concrete deformation model based on experimental data. Such model matches the criteria set. For validation of the model adequacy the results of comparing the model being proposed with the concrete deformation model used in the standards for different concrete classes are presented in graphical and tabular form. The results obtained confirm the adequacy of the deformation model proposed.

Keywords: stress-strain diagram of concrete, reconstruction, reinforced concrete, compressive strain.

Введение

С каждым годом увеличивается количество как вновь построенных зданий и сооружений, так и тех для которых наступают сроки очередного обследования технического состояния [1]. В общепринятые деформационные модели заложено соответствием между прочностью и начальным модулем деформации. Как показывают эксперименты, это соответствие нарушается за счет нарастания прочности [2, 3] до двух раз относительно расчетной прочности [4], старения бетона [5] или деградации [6] и изменения модуля упругости [7], происходящих в процессе эксплуатации зданий и сооружений в силу ряда причин таких, как окружающая среда, изменяющаяся температура, эксплуатационный износ и т.д.

Поэтому при необходимости расчета железобетонных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений для проверки их несущей способности или реконструкции и реновации необходимо иметь деформационные кривые, соответствующие происшедшим изменениям зависимостей между прочностью и модулем деформации бетонов соответствующих классов.

Чтобы учесть произошедшие изменения характеристик, модель должна быть основана на характеристиках бетона, полученных в процессе обследования. Наиболее простое решение этой задачи можно получить с помощью экспоненциальной модели [8], основанной на уравнении Аррениуса. Для подтверждения адекватности описания моделью деформирования бетона установим соответствие предложенной модели требуемым критериям и сравним с моделью, заложенной в действующие нормы [9].

Модели и методы

Общеизвестно уравнение шведского ученого С. Аррениуса:

$$k = A \cdot e^{-E_a/R \cdot T} \quad (1)$$

где k – константа скорости химической реакции;

$A = (a \cdot T^{1/2})$ – общее число взаимодействий молекул;

e – основание натурального логарифма;

E_a – энергия активации Дж/моль;

R – газовая постоянная 8.31 Дж/моль·Т;

T – температура в К.

Это уравнение, изначально полученное для описания кинетических процессов, происходящих в газах, успешно применялось исследователями для описания диаграммы (σ – ε) металлов и сплавов. Ж. Виола, используя выражение Аррениуса, получил логарифмические законы связи напряжений и деформаций для металлических конструкций, которые определяют только часть кривой деформирования – упрочнения металла после достижения предела текучести.

В. Faucher и А. Krausz применили формулу Аррениуса для определения модели деформирования и получили уравнения для определения релаксаций напряжений в алюминии, меди, стали, титане. Получаемые по этим уравнениям результаты были достаточно точны. Далее Зегер [10] предложил логарифмическую зависимость связи между напряжениями, температурой и скоростью деформаций металла. Н.Н. Давиденков, применяя уравнение Аррениуса, получил зависимость между пределом текучести металла и скоростью деформирования [11]. П.И. Полухин [12] предложил использовать уравнения Аррениуса для получения зависимости между температурой, напряжениями и деформациями в металлах.

Зависимость на основе уравнения Аррениуса для бетона, можно получить после замены в выражении (1) переменной T (температура) на относительные деформации ε , а также констант выражения (1) на коэффициенты a и b , как это описано в [8]. В конечном итоге, выражение для описания диаграммы деформирования бетона выглядит следующим образом:

$$\sigma(\varepsilon) = a \cdot \varepsilon^b \cdot e^{\frac{-b \cdot \varepsilon}{p}} \quad (2),$$

где $\sigma(\varepsilon)$ – функция напряжений;

ε – текущие относительные деформации бетона.

Коэффициенты a и b подбираются для конкретного бетона исходя из граничных условий по его прочности и модулю упругости независимых друг от друга, а параметр p соответствует предельным относительным деформациям и определяется на основании данных из эксперимента при обследовании конструкций.

Результаты исследования и их анализ

Зависимость (2) на основе уравнения Аррениуса отвечает критериям [13], которым должны отвечать любые выражения, описывающие связь (σ - ε) в бетоне:

- При определенном значении ε (в нашем случае это p) $\sigma = R_b$;
- Первая производная в начале деформирования равна E_b $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E_b$;
- Первая производная при $\varepsilon = p$ равна нулю $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0$;
- Очертания кривой после $\varepsilon = p$ – близки к дуге окружности;
- При максимальных значениях ε напряжения $\sigma = 0,85 R_b$.

Из рисунков 1 и 2 видно, что для выражения (2) эти критерии выполняются.

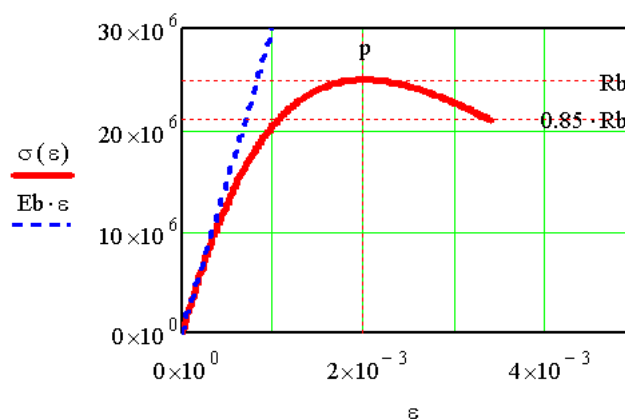


Рисунок 1 - График диаграммы бетона B25, описанной с помощью выражения (2)

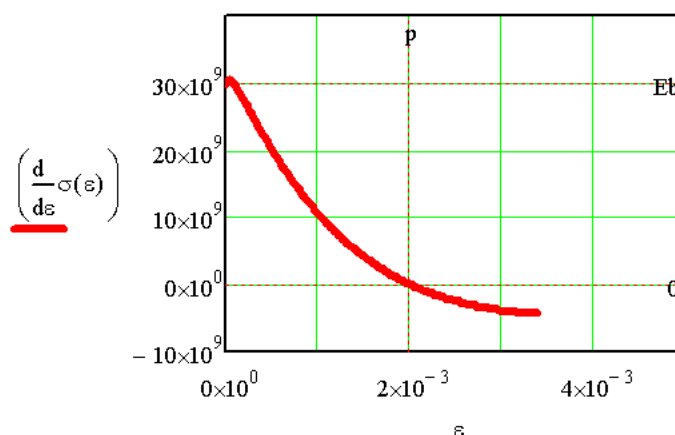


Рисунок 2 - График первой производной функции, описанной выражением (2)

Проведем сравнение диаграмм состояния бетона по нелинейной деформационной модели, представленной в СП 63.13330.2018 [9], и предложенной модели на основе выражения (2) для различных классов бетона (B15, B20, B30, B40, B60 и B100). В качестве характеристик материала будем использовать данные приведенные в таблицах СП 63.13330.2018 для соответствующих классов бетона по прочности. Для всех классов бетона примем предельные относительные деформации $p = 0,002$. При построении деформационной модели на основе выражения (2) с использованием характеристик бетона из норм, как показано выше, требуется определить соответствующие друг другу значения относительных деформаций и напряжений в бетоне в зоне условно линейных деформаций. Эти значения получим исходя из соотношения $\varepsilon_b = \sigma_b/E$, где σ_b соответствует уровню напряжений 10 – 30% R_b [14].

Результаты расчета приведены в таблице 1, в которой содержатся значения величин относительных деформаций (столбец 2) и соответствующие им значения напряжений в бетоне классов B15 и B20, полученные по СП 63.13330.2018 (столбцы 3, 6) и рассчитанные с

помощью предлагаемого выражения (2) (столбцы 4, 7), а также процент их расхождения, указанный в столбцах 5 и 8.

Таблица 1 - Значения величин относительных деформаций и соответствующие им значения напряжений бетона классов В15 и В20

Класс бетона		B15			B20		
	относительные деформации бетона	Напряжения в бетоне					
N п/п	$\varepsilon \cdot 10^{-5}$	СП	(2.3)	(СП-(2.3))/2.3	СП	(2.3)	(СП-(2.3))/2.3
		МПа	МПа	%	МПа	МПа	%
1	2	3	4	5	6	7	8
1	46	6,945211	6,480926	-7,16%	8,789448	8,287619	-6,06%
2	55	7,694432	7,170311	-7,31%	9,854312	9,282456	-6,16%
3	64	8,324165	7,771883	-7,11%	10,77032	10,16017	-6,01%
4	73	8,850996	8,297662	-6,67%	11,55458	10,9341	-5,67%
5	82	9,290929	8,757005	-6,10%	12,22307	11,61516	-5,23%
6	91	9,656537	9,157475	-5,45%	12,78935	12,21249	-4,72%
7	100	9,958409	9,50535	-4,77%	13,26541	12,73395	-4,17%
8	109	10,2056	9,805953	-4,08%	13,66197	13,18643	-3,61%
9	118	10,40599	10,06387	-3,40%	13,98873	13,57601	-3,04%
10	127	10,56646	10,28311	-2,76%	14,25446	13,90812	-2,49%
11	136	10,69308	10,46721	-2,16%	14,46722	14,18765	-1,97%
12	145	10,79118	10,6193	-1,62%	14,63429	14,41904	-1,49%
13	154	10,8654	10,7422	-1,15%	14,76229	14,60632	-1,07%
14	163	10,92036	10,83845	-0,76%	14,85712	14,75317	-0,70%
15	172	10,95827	10,91035	-0,44%	14,92396	14,86297	-0,41%
16	181	10,98259	10,95998	-0,21%	14,96822	14,93881	-0,20%
17	190	10,99561	10,98925	-0,06%	14,992	14,98356	-0,06%
18	199	10,99952	10,9999	0,00%	14,99922	14,99984	0,00%
19	208	10,9911	10,99352	0,02%	14,98722	14,99009	0,02%
20	217	10,96061	10,97159	0,10%	14,94319	14,95656	0,09%
21	226	10,91168	10,93546	0,22%	14,87231	14,90134	0,19%
22	235	10,84656	10,88638	0,37%	14,77769	14,82635	0,33%
23	244	10,76751	10,8255	0,54%	14,66245	14,7334	0,48%
24	253	10,67652	10,75388	0,72%	14,5294	14,62413	0,65%
25	262	10,57543	10,67251	0,91%	14,38123	14,5001	0,82%

Таблица 2- Значения величин относительных деформаций и соответствующие им значения напряжений бетона классов В30 и В40

Класс бетона		В30			В40		
	относительные деформации бетона	Напряжения в бетоне					
N п/п	$\epsilon \cdot 10^{-5}$	СП	(2.3)	(СП-(2.3))/2.3	СП	(2.3)	(СП-(2.3))/2.3
		МПа	МПа	%	МПа	МПа	%
1	2	3	4	5	6	7	8
1	46	11,58375	11,30508	-2,46%	13,83394	14,24344	2,88%
2	55	13,18265	12,83877	-2,68%	15,92896	16,3161	2,37%
3	64	14,60087	14,20876	-2,76%	17,83566	18,18189	1,90%
4	73	15,85293	15,4289	-2,75%	19,5599	19,85397	1,48%
5	82	16,95017	16,5114	-2,66%	21,10941	21,34498	1,10%
6	91	17,90496	17,46724	-2,51%	22,48985	22,66709	0,78%
7	100	18,72869	18,30638	-2,31%	23,70929	23,83185	0,51%
8	109	19,43142	19,03792	-2,07%	24,77572	24,85023	0,30%
9	118	20,02645	19,67024	-1,81%	25,69757	25,73262	0,14%
10	127	20,52132	20,21104	-1,54%	26,48365	26,48883	0,02%
11	136	20,92678	20,66745	-1,25%	27,14306	27,12812	-0,06%
12	145	21,25236	21,04609	-0,98%	27,6851	27,6592	-0,09%
13	154	21,50714	21,3531	-0,72%	28,11924	28,09028	-0,10%
14	163	21,69974	21,59416	-0,49%	28,45498	28,42906	-0,09%
15	172	21,83821	21,77459	-0,29%	28,70181	28,6828	-0,07%
16	181	21,92935	21,89932	-0,14%	28,86899	28,8583	-0,04%
17	190	21,98238	21,97294	-0,04%	28,96611	28,96191	-0,01%
18	199	21,99972	21,99974	0,00%	28,99949	28,99963	0,00%
19	208	21,9796	21,98369	0,02%	28,97055	28,97704	0,02%
20	217	21,90872	21,92852	0,09%	28,86727	28,89939	0,11%
21	226	21,79402	21,83768	0,20%	28,69906	28,77156	0,25%
22	235	21,63998	21,7144	0,34%	28,47161	28,59814	0,44%
23	244	21,45137	21,56168	0,51%	28,19167	28,3834	0,68%
24	253	21,2324	21,38231	0,70%	27,86364	28,13132	0,95%
25	262	20,98749	21,1789	0,90%	27,49522	27,84563	1,26%

В таблице 2 приведены результаты расчета для бетонов классов В30 и В40. Значения величин относительных деформаций (столбец 2) и соответствующие им значения напряжений в бетоне, полученные по СП 63.13330.2018 (столбцы 3, 6) и рассчитанные с помощью предлагаемого выражения (2) (столбцы 4, 7), а также процент их расхождения, указанный в столбцах 5 и 8.

Кроме того, в таблице 3 приведены результаты расчета для бетонов классов В60 и В100. Значения величин относительных деформаций (столбец 2) и соответствующие им значения напряжений в бетоне, полученные по СП 63.13330.2018 (столбцы 3, 6) и рассчитанные с помощью предлагаемого выражения (2) (столбцы 4, 7), а также процент их расхождения, указанный в столбцах 5 и 8.

Таблица 3- Значения величин относительных деформаций и соответствующие им значения напряжений бетона классов В60 и В100

Класс бетона		B60			B100		
	относительные деформации бетона	Напряжения в бетоне					
N п/п	$\varepsilon \cdot 10^{-5}$	СП	(2.3)	(СП-(2.3))/2.3	СП	(2.3)	(СП-(2.3))/2.3
		МПа	МПа	%	МПа	МПа	%
1	2	3	4	5	6	7	8
1	46	16,79427	18,13172	7,38%	19,6679	19,16769	-2,61%
2	55	19,69274	21,38446	7,91%	23,44932	24,61687	4,74%
3	64	22,44283	24,38987	7,98%	27,19308	30,04938	9,51%
4	73	25,03721	27,14032	7,75%	30,89215	35,33489	12,57%
5	82	27,46947	29,63538	7,31%	34,53919	40,37596	14,46%
6	91	29,73416	31,87938	6,73%	38,12645	45,10154	15,47%
7	100	31,82678	33,87979	6,06%	41,64569	49,46187	15,80%
8	109	33,74542	35,64611	5,33%	45,08795	53,42436	15,60%
9	118	35,48511	37,18919	4,58%	48,44334	56,97021	14,97%
10	127	37,0449	38,5207	3,83%	51,70065	60,09167	13,96%
11	136	38,42362	39,65273	3,10%	54,84682	62,78973	12,65%
12	145	39,621	40,59751	2,41%	57,86606	65,07223	11,07%
13	154	40,63614	41,36726	1,77%	60,73838	66,95229	9,28%
14	163	41,47013	41,974	1,20%	63,43697	68,44699	7,32%
15	172	42,12314	42,42944	0,72%	65,92285	69,57635	5,25%
16	181	42,59559	42,74494	0,35%	68,1326	70,36237	3,17%
17	190	42,88769	42,93142	0,10%	69,94082	70,82836	1,25%
18	199	42,99847	42,99933	0,00%	70,98233	70,99833	0,02%
19	208	42,94275	42,95866	0,04%	70,79279	70,89653	0,15%
20	217	42,74549	42,81888	0,17%	69,99402	70,54701	0,78%
21	226	42,4142	42,58896	0,41%	68,45481	69,97339	2,17%
22	235	41,95622	42,27739	0,76%	65,98976	69,19859	4,64%
23	244	41,37891	41,89213	1,23%	62,39221	68,24464	8,58%
24	253	40,69138	41,44069	1,81%			
25	262	39,90277	40,9301	2,51%			

Графически результаты расчетов проиллюстрированы на рисунках 3 и 4.

Из рисунка 3 видно, что кривые, построенные по предлагаемой методике на основе выражения (2), практически совпадают с кривыми, построенными по методике СП 63.13330.2018 для бетонов классов В15, В20 и В30.

Аналогично, из рисунка 4 видно, что кривые, построенные по предлагаемой методике на основе выражения (2), практически совпадают с кривыми, построенными по методике СП 63.13330.2018 для бетонов классов В40 и В60. Кривые для бетона класса В100, при значении

предельных относительных деформации $\rho = 0,002$ имеют различия в отдельных областях при напряжениях σ_b от 40 до 65 МПа до 15.8% согласно таблице 3

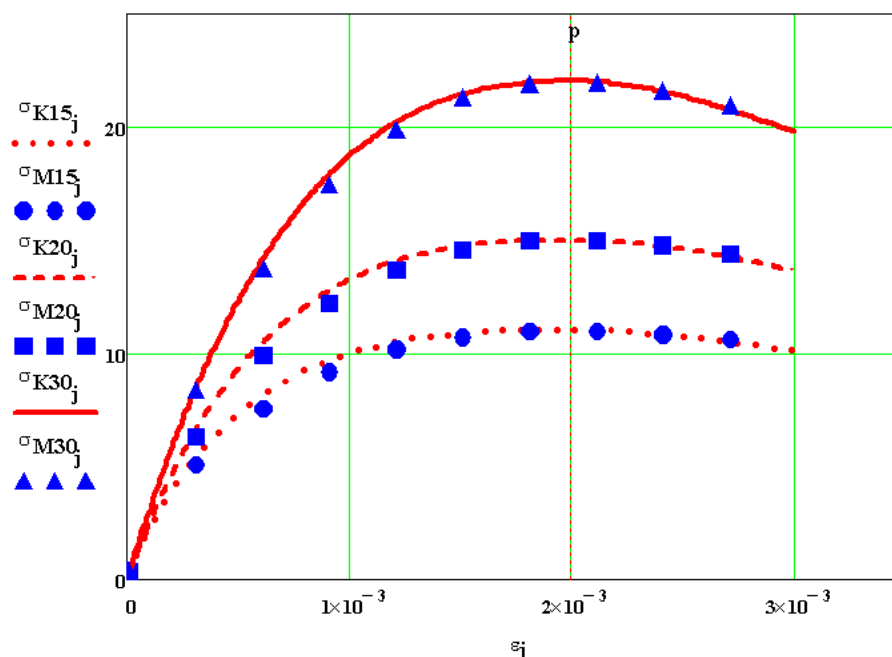


Рисунок 3 - Кривые деформирования при сжатии для бетона, полученные согласно СП 63.13330.2018 σ_{K15} – для бетона B15, σ_{K20} – для бетона B20, σ_{K30} – для бетона B30 и результаты расчета по предлагаемому выражений (2) σ_{M15} – для бетона B15, σ_{M20} – для бетона B20, σ_{M30} – для бетона B30

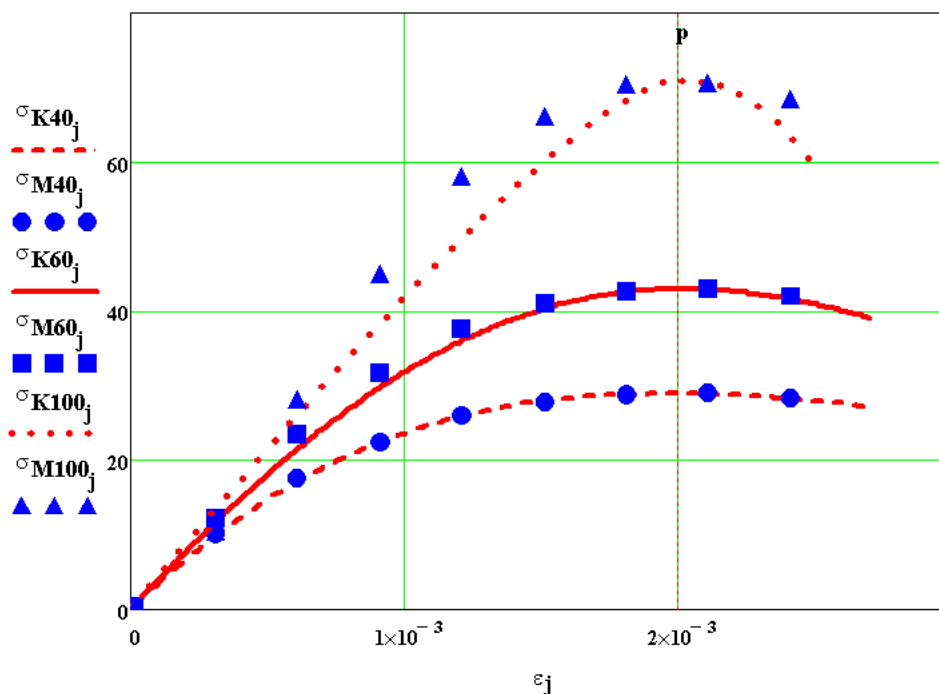


Рисунок 4 - Кривые деформирования при сжатии для бетона, полученные согласно СП 63.13330.2018 σ_{K40} – для бетона B40, σ_{K60} – для бетона B60, σ_{K100} – для бетона B100 и результаты расчета по предлагаемому выражений (2) σ_{M40} – для бетона B40, σ_{M60} – для бетона B60, σ_{M100} – для бетона B100

Выводы

Полученные результаты сравнения подтверждают, что предлагаемая деформационная модель на основе уравнения Аррениуса для бетона после длительной эксплуатации достаточно точно описывает деформирование свежеприготовленного бетона различных классов, соответствует модели, заложенной в нормативные материалы, что в целом позволяет сделать вывод о возможности её применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 255.1325800.2016 «Здания и сооружения. Правила эксплуатации. Основные положения».
2. Mushtaq Sadiq Radhi, Shakir Ahmed Al-Mishhadani, Hasan Hamodi Joni. Effect of Age on Concrete Core Strength Results // The 2nd International Conference of Buildings, Construction and Environmental Engineering (BCEE2-2015) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/307858837> (дата обращения: 01.11.2021).
3. Селяев, В.П., Низина Т.А. Оценка долговечности железобетонных конструкций с применением метода деградационных функций // Второй международный симпозиум «Проблемы современного бетона и железобетона». Минск. 2009. С. 369–385.
4. Баженов Ю.М., Мурашкин В.Г. Учет изменения прочности бетона при проектировании железобетонных конструкций // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2017. № 20. С. 244–251.
5. Гениев Г.А. Зависимость прочности бетона от времени // Бетон и железобетон. 1993. № 1. С. 15–17.
6. Петров В.В. К вопросу построения моделей расчета долговечности конструкций // Сб. Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций. Саранск: СГУ. 2014. С. 136–144.
7. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Травуш В.И. [и др.] Оценка прочностных и деформационных характеристик высокопрочных бетонов в конструкциях и динамики их изменения во времени // Строительные материалы. 2023. № 11. С. 28–38.
8. Travush V.I., Murashkin V.G. Concrete Deformation Model for Reconstructed Reinforced Concrete // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. Vol. 18, No. 4. P. 132–137.
9. СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».
10. Зегер А. Возникновение дефектов решетки при движении дислокаций и их влияние на температурную зависимость деформирующих напряжений ГЦК кристаллов // Сб. сокр. пер. и рефератов иностр. период. литературы «Проблемы современной физики. Дислокации в кристаллах». М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. С. 179–268
11. Потапова Л.Б., Ярцев В.П. Механика материалов при сложном напряженном состоянии М.: «Издательство Машиностроение – 1». 2005. 244 с.
12. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации М.: «Металлургия». 1982. 584 с.
13. Байков В.Н., Горбатов С.В., Димитров З.А. Построение зависимости между напряжениями и деформацией сжатого бетона по системе нормируемых показателей // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1977. №6. С. 15–18.
14. Мурашкин Г.В., Мурашкин В.Г. Моделирование диаграмм деформирования бетона // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. 2007. № 2 (14). С. 86–88.

REFERENCES

1. SP 255.1325800.2016. Zdaniya i sooruzheniya. Pravila ekspluatatsii. Osnovnye polozheniya [Buildings and structures. Operating rules. Basic provisions]. (rus).
2. Mushtaq Sadiq Radhi, Shakir Ahmed Al-Mishhadani, Hasan Hamodi Joni. Effect of Age on Concrete Core Strength Results *The 2nd International Conference of Buildings, Construction and Environmental Engineering (BCEE2-2015)*. [Online] URL: <https://www.researchgate.net/publication/307858837>.
3. Selyaev, V.P., Nizina T.A. Otsenka dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruktсий s primeneniem metoda degradatsionnykh funktsiy [Evaluation of the durability of reinforced concrete structures using the method of degradation functions]. Vtoroj mezhdunarodnyj simpozium «Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona» The

Second International Symposium «Problems of Modern Concrete and Reinforced Concrete». Minsk. 2009. Pp. 369–385. (rus).

4. Bazhenov Y.M., Murashkin V.G. Uchet izmeneniya prochnosti betona pri proektirovanii zhelezobetonnykh konstruksij [Taking into account changes in concrete strength when designing reinforced concrete structures] *Vestnik Volzhskogo regional'nogo otdeleniya Rossijskoj akademii arkhitektury i stroitel'nykh nauk*. 2017. № 20. Pp. 244-251. (rus).

5. Geniev G.A. Zavisimost' prochnosti betona ot vremeni [Dependence of concrete strength on time] *Beton i zhelezobeton*. 1993. № 1. Pp. 15-17. (rus).

6. Petrov V.V. K voprosu postroeniya modelej rascheta dolgovechnosti konstruksij [On the issue of constructing models for calculating the durability of structures] *Sb. Dolgovechnost' stroitel'nykh materialov, izdelij i konstruksij*. Saransk: SGU. 2014. Pp. 136-144. (rus).

7. Kaprielov S. S., Shejfel'd A.V., Travush V.I., Karpenko N.I., Krylov S.B. [Assessment of Strength and Deformation Characteristics of High-Strength Concrete in Structures and the Dynamics of Their Changes over Time] *Ocenka prochnostnyh i deformacionnyh harakteristik vysokoprochnykh betonov v konstrukciyah i dinamiki ih izmeneniya vo vremeni Stroitel'nye materialy*. 2023. № 11. Pp. 28-38. (rus).

8. Travush V. I., Murashkin V.G. Concrete Deformation Model for Reconstructed Reinforced Concrete *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. Vol. 18, No. 4. Pp. 132-137.

9. SP 63.13330.2018 Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozheniya [Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions] (rus).

10. Zeger A. Vozniknovenie defektov reshetki pri dvizhenii dislokacij i ih vliyanie na temperaturnyu zavisimost' deformiruyushchih napryazhenij GCK kristallov [The emergence of lattice defects during the motion of dislocations and their influence on the temperature dependence of the deforming stresses of FCC crystals] *Problemy sovremennoj fiziki. Dislokacii v kristallah*. Moscow. Izd-vo inostrannoj literatury. 1960. Pp. 179-268.

11. Potapova L.B., Yarcev V.P. Mekhanika materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii [Mechanics of materials under complex stress state] Moscow. Mashinostroenie – 1. 2005. 244p. (rus).

12. Poluhin P.I., Gorelik S.S., Voroncov V.K. Fizicheskie osnovy plasticheskoy deformacii [Physical basis of plastic deformation] Moscow. «Metallurgiya». 1982. 584p. (rus).

13. Bajkov V.N., Gorbato V., Dimitrov Z.A. Postroenie zavisimosti mezhdu napryazheniyami i deformaciy zhatogo betona po sisteme normiruemykh pokazatelej [Construction of the relationship between stresses and deformations of compressed concrete using a system of standardized indicators] *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura*. – 1977. - №6.- Pp.15-18. (rus).

14. Murashkin G.V., Murashkin V.G Modelirovanie diagramm deformirovaniya betona [Concrete stress-strain diagrams modeling] *Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i transport*. 2007. № 2 (14). Pp. 86-88. (rus).

Информация об авторах

Мурашкин Василий Геннадьевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», г. Самара, Россия,
канд. техн. наук, доцент
E-mail: murvag@mail.ru

Information about authors

Murashkin Vasily G.

Samara State Technical University, Samara, Russia,
candidate in tech. sc., docent
E-mail: murvag@mail.ru

В.В. НАДОЛЬСКИЙ^{1,2}¹ УО «Брестский государственный технический университет» (БрГТУ), г. Брест, Республика Беларусь² Белорусский национальный технический университет (БНТУ), г. Минск, Республика Беларусь

НОРМИРУЕМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. Учитывая изменчивую природу несущей способности и воздействий, проверка проектной надежности строительных конструкций сводится к обеспечению того, что вероятность наступления предельного состояния не должна превышать целевое (допустимое) значение. Этот метод известен как вероятностный метод проверки предельных состояний. Существуют более простые методы проверки предельных состояний для инженерных расчетов, наиболее популярным из которых является метод коэффициентов надёжности. Однако в той или иной степени все существующие методы проверки предельных состояний и, соответственно, методы обеспечения проектной надежности строительных конструкций основаны на вероятностном методе. По этой причине исследования и нормативное закрепление допустимых вероятностей отказа являются одной из первостепенных задач научного сообщества и национальных органов в области разработки строительных норм и правил. На основании аналитического обзора исследований представлено описание вероятности отказа и индекса надежности как мер проектной надежности; зафиксированы положения, на основании которых необходимо назначать целевое значение вероятности отказа, включая прямые и косвенные последствия отказа; представлены результаты сравнения численных значений индексов надежности. Наиболее полная методика определения целевых значений вероятности отказа изложена в международном стандарте ISO 2394. Данный стандарт содержит указания по определению целевых индексов надежности на основе экономической оптимизации, анализа индивидуального или общественного риска, а также индекса качества жизни. Однако данная методика и, в особенности, численные значения индексов надежности требуют адаптации с учетом экономических особенностей конкретной страны.

Ключевые слова: вероятность отказа, индекс надежности, формат безопасности, вероятностный метод, коэффициенты надежности, неопределенности, Еврокод.

V.V. NADOLSKI^{1,2}¹ Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus² Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

STANDARDIZED VALUES OF THE FAILURE PROBABILITY OF BUILDING STRUCTURES

Abstract. Taking into account the variable nature of load-bearing capacity and loads, checking the design reliability of building structures leads to ensuring that the probability of occurrence of the limit state should not exceed the target (permissible) value. This method is known as the probabilistic limit state verification method. There are simpler methods for checking limit states for engineering calculations, the most popular of which is the method of reliability factors. However, all existing methods for checking limit states and, accordingly, methods for ensuring the design reliability of building structures are based on the probabilistic method. For this reason, research and the normative consolidation of acceptable failure probabilities are one of the primary tasks of the scientific community and national authorities in the field of developing norms and rules. Based on an analytical review of the research, a description of the probability of failure and the reliability index as measures of design reliability is presented and provisions are fixed on the basis of which it is necessary to assign a target value for the probability of failure, including direct and indirect consequences of failure.

The conditions for assigning target failure probabilities in regulatory documents are systematized and the results of comparing the numerical values of reliability indices are presented. The most complete methodology for determining the target values of the probability of failure is set out in the international standard ISO 2394. This standard contains guidelines for determining target reliability indices based on economic optimization, analysis of individual or public risk, as well as the quality of life index. However, this methodology, and in particular the numerical values of reliability indices, require adaptation taking into account the economic characteristics of a particular country.

Keywords: *probability of failure, reliability index, safety format, probabilistic method, reliability factors, uncertainties, Eurocode.*

Введение

Проектирование строительных конструкций выполняется в рамках метода предельных состояний. В свою очередь, предельное состояние соответствует дискретному представлению поведения (отклика, реакции) конструкции при заданном воздействии, с которым могут быть связаны потери и/или повреждения [1]. Учитывая изменчивую природу несущей способности и воздействий, проверка проектной надежности строительных конструкций сводится к обеспечению того, что вероятность наступления предельного состояния p_f не превышает допустимое значение p_t , т.е. $p_f \leq p_t$. Этот метод известен как вероятностный метод проверки предельных состояний [2, 3]. Существуют более простые методы проверки предельных состояний для инженерных расчетов, наиболее популярным из которых является метод коэффициентов надёжности. Однако в той или иной степени все существующие методы проверки предельных состояний и, соответственно, методы обеспечения проектной надежности строительных конструкций основаны на вероятностном методе [4, 5].

По этой причине исследования и нормативное закрепление допустимых вероятностей отказа являются одной из первостепенных задач научного сообщества и национальных органов в области разработки строительных норм и правил [6]. Однако в Российской Федерации не установлены целевые значения показателя надежности, об этом отмечает один из авторов ГОСТ 27751, профессор В.Д. Райзер: *“Невозможно также сказать, какой уровень надежности требуют нормы проектирования, и должен ли он быть одинаковым для всех сооружений или различаться, а если должен различаться, то в каких пределах и в зависимости от чего”* [7]. Отсутствие целевых значений вероятности отказа сдерживает развитие и внедрение вероятностных методов проверок предельных состояний, так как расчетное (полученное) значение вероятности отказа не с чем сравнивать и, соответственно, невозможно сделать вывод о достаточности надежности [8, 9]. Поэтому целью данного научного исследования является аналитический обзор и анализ значений вероятностей отказа, регламентированных в международных нормативных документах EN1990, ISO 2394, ASCE 7, а также анализ наиболее актуальных научных исследований в этой области.

Модели и методы

Существует несколько важных концептуальных аспектов, положенных в основу определения и нормирования вероятности отказа, которые необходимо рассмотреть прежде, чем переходить к обзору значений, закрепленных в нормативных документах. На практике вместо значений вероятности отказа используют связанные с ними значения индекса надежности, поэтому далее по тексту будет также использоваться этот термин.

Одной из ключевых особенностей индекса надежности является то, что это мера проектной надежности. При этом проектная надежность зданий, как правило, превышает целевые значения из-за скрытых резервов в моделях несущей способности (например, пренебрежение вкладом продольной арматуры в сопротивление сдвигу) или моделях воздействий (например, консервативное упрощение зонирования на картах климатических воздействий), а также из-за требований конструирования и т.д. В свою очередь, «фактическая» надежность сооружения зависит от намного большего количества факторов.

Доминирующими из них являются человеческие ошибки, которые минимизируются процедурами контроля качества, а не проектными требованиями.

Значения индексов надежности существенно *зависят от предпосылок*, при которых они были получены. В целом индекс надежности связан с этими предпосылками и не может рассматриваться отдельно от них. Наиболее важные предпосылки касаются вероятностных моделей базисных переменных. Поэтому второй важной особенностью индекса надежности является то, что это мера *относительной* надежности, т.е. надежность сравнивается между базовым и рассматриваемым случаем, поэтому корректнее говорить о том, что одно конструктивное решение более надежно или менее надежно при одинаковых предпосылках.

Следующей особенностью индекса надежности является то, что он регламентируется для *конструктивного элемента*, а не для системы, хотя при его назначении могут использоваться параметры всего здания. Методы теории надежности и значения индексов надежности в первую очередь разработаны для конструктивного элемента. Однако большинство конструкций представляют собой систему конструктивных элементов. Очевидно, что отказ системы является более серьезным последствием, чем отказ одного конструктивного элемента. Поэтому в общем случае необходимо рассматривать отказ системы, а не отдельного конструктивного элемента. Системное поведение конструкций можно количественно оценить с помощью вероятностного анализа. Однако такой анализ надежности системы требует от инженера значительной изобретательности и специализированных навыков в области теории надежности, вероятности и статистики, поэтому его реализация затруднительна на практике. На основании вышеотмеченных рассуждений может оказаться уместным увеличение значения индекса надежности конструктивного элемента для конструкции с несколькими ключевыми элементами или для конструктивного элемента с несколькими одинаково важными видами отказов.

Следующей особенностью является то, что целевой уровень надежности *должен быть определен и назначен с учетом последствий отказа*. Последствия отказа – это один из самых важных и базовых показателей, которые должны учитываться при определении и назначении индекса надежности. Последствия отказа включают социальные (угроза здоровью и жизни людей), экологические, экономические последствия, потерю ценности культурного наследия и т.д. [10]. Последствия отказа должны анализироваться с учетом прямых и косвенных, в том числе с учетом единовременных и долговременных (последующих) последствий. Примером косвенных последствий могут быть лица, не получившие необходимых услуг в случае выхода из строя конструкций больницы, пожарного депо и т.д. К лицам (жизням), подвергающимся риску из-за разрушения конструкции, также относятся лица, которые могут находиться вне конструкции, но затронуты в случае разрушения конструкции. Следует также уделять внимание долгосрочным рискам, а не только тем, которые возникают непосредственно при разрушении конструкции. Более высокий уровень надежности следует назначать для сооружений с высоким уровнем заселенности (использования людьми), а также для сооружений, выполняющих важные функции для населения (больницы, пожарные депо, важные мосты, пути эвакуации в зданиях с высокой посещаемостью и т.д.). Традиционно последствия отказа рассматривают обобщенно для всего здания, однако конкретный конструктивный элемент может быть отнесен к более высокому или более низкому уровню надежности, чем присвоенный всей конструкции.

В большинстве нормативных документов последствия отказа учитываются косвенно посредством классов последствий, при этом используют качественные (лингвистические) характеристики для определения класса последствий, что вызывает субъективизм при назначении уровня надежности. В этой связи интерес представляют исследования по назначению классов последствий в зависимости от количественных характеристик. В работе [11] представлены рекомендации по назначению класса последствий для здания в зависимости

от количества людей N , подвергающихся риску: СС1 при $N < 10$, СС2 при $10 \leq N < 1000$ и СС3 при $N \geq 1000$ или для сооружений, используемых в важных отраслях промышленности, или обслуживающие сообщества с населением более 5000 человек. В работе [12] представлены рекомендации по дифференциации надежности конструктивных элементов в зависимости от отношения N_{col}/A_{col} (в чел./м²), где N_{col} – количество лиц, подвергающихся риску; A_{col} – площадь обрушения, относящаяся к сценарию обрушения элемента, в следующем виде:

- СС1 при $N_{col}/A_{col} \leq 0,01$ (типичными примерами являются здания и/или зоны в зданиях, в которых люди обычно не находятся, например, сельскохозяйственные объекты);
- СС2 при N_{col}/A_{col} в пределах $0,01 < N_{col}/A_{col} \leq 0,1$ (примеры – жилые и офисные помещения, исключая места скопления людей);
- СС3 при $N_{col}/A_{col} > 0,1$ (примеры – места скопления людей, включая вестибюли, залы ожидания, конференц-центры, актовые залы, спортивные и плавательные сооружения, трибуны, кинотеатры, театры, музеи, аудитории).

Когда область обрушения может быть связана с различными отношениями N_{col}/A_{col} , для установления класса последствий может быть принято консервативное значение или средневзвешенное значение. Отношение N_{col}/A_{col} может зависеть от характера рассматриваемого режима отказа. Хотя пластическое разрушение может дать людям предупреждение о своевременной эвакуации из здания, однако такой сценарий рекомендуется консервативно исключить при оценке количества людей, подвергающихся риску.

При выборе целевого уровня надежности также учитываются затраты и усилия, необходимые для снижения вероятности отказа [13].

Следующей особенностью индекса надежности является то, что целевые уровни *связаны с периодом отнесения*. Под периодом отнесения подразумевается период времени, принимаемый для статистического описания параметров базисных переменных, зависящих от времени. Очевидно, что целевая надежность всегда должна указываться вместе с периодом отнесения, учитываемым при проверке надежности [14]. Согласно ISO 2394 в качестве периода отнесения можно рассматривать срок службы для предельных состояний эксплуатационной пригодности и усталости, в то время как более короткий период отнесения может быть разумным для предельных состояний несущей способности.

Расчетный или остаточный срок службы и период отнесения (базовый период) для целевого значения индекса надежности можно выбрать независимо. Целевое значение индекса надежности и распределение экстремальных значений, используемые для представления изменяющихся во времени воздействий (доминирующего воздействия в комбинации нагрузок), должны быть основаны на одном и том же периоде отнесения. Когда проверка надежности выполняется для годового периода отнесения, то годовой целевой индекс надежности рассматривается вместе с сопротивлением и воздействием, рассчитанными для года. Целевая надежность, относящаяся к одному периоду отнесения, может быть пересчитана на другой период отнесения с использованием методологии, описанной в [15], с учетом зависимости между годовыми событиями отказа. Из-за значительного влияния постоянных воздействий и изменчивости сопротивления в среднем ежегодные случаи отказа имеют умеренную корреляцию [16, 17], что необходимо учитывать при пересчете индексов надежности для разных периодов отнесения.

В общем случае при определении последствий отказа, соответственно и индекса надежности, следует учитывать различие между пластичным и хрупким разрушением, возможностью прогрессирующего разрушения. Однако на сегодня, к сожалению, данные особенности не учитываются в нормах проектирования. Целевые показатели надежности рекомендуются для пластичных элементов конструкции, разрушение которых допускает перераспределение внутренних усилий и, таким образом, не приводит сразу к полному или частичному разрушению конструкции, что позволяет принять меры для снижения тяжелых последствий. Отказу пластичного компонента предшествует предупреждение, предварительные признаки, однако следует констатировать тот факт, что при реальной

эксплуатации конструкции такие признаки трудно идентифицируются обычными людьми (обывателями). Поэтому с помощью явных требований или соответствующей детализации следует гарантировать отсутствие хрупкого разрушения. Элемент конструкции, который может внезапно разрушиться без предупреждения, должен соответствовать более высокому уровню надежности, чем рекомендуемый для пластического разрушения.

Собственно, после того как зафиксированы основы, на которых базируются значения индексов надежности, далее перейдем к рассмотрению значений, регламентированных в нормативных документах.

Результаты исследования и их анализ

Одним из первых нормативных документов, на который стоит обратить внимание, является EN 1990, который используется всеми европейскими странами, рядом Скандинавских и некоторыми странами с постсоветского пространства, а именно Республикой Казахстан, Республикой Беларусь. Основная цель, которая преследовалась при нормировании индексов надежности в EN 1990, – это обеспечение единых значений индексов надежности для унификации и сопоставимости результатов на территории европейских стран. Однако регламентированные этим документом значения индекса надежности часто критикуют из-за их высоких значений. Подробный анализ последствий применения таких высоких значений индексов надежности представлен в исследовании [18]. Помимо явных последствий экономической нецелесообразности применения таких больших значений индекса надежности (значения частных коэффициентов для переменных воздействий достигают 2.0...2.5 [19], что не согласуется с многолетней практикой проектирования по всему миру), есть и серьезные методологические противоречия: *«результаты расчетов показывают, что вероятность превышения расчетных значений составила в среднем 10^{-5} . Данная вероятность возможна только при нормировании редких природных и климатических явлений (например, сейсмических) или чрезвычайного (особого) значения воздействия. Прогнозирование возможных значений случайных величин для таких малых вероятностей становится сомнительным: длина экстраполяции аппроксимирующей функции противоречит математическим принципам; существенная изменчивость конечного результата от принятых предпосылок; нестабильность получаемых результатов»* [18]. По этой причине в последних редакциях СН 2.01.01 требования к оценке целевых значений дополнены формулировкой: *«при определении частных коэффициентов рекомендуется выполнять анализ надежности с учетом существующей практики проектирования и требований действующих ТНПА»*, для более подробной информации см. [20, 21, 22]

Следующий документ, заслуживающий внимания, это ISO 2394, который содержит более подробные рекомендации по назначению уровней надежности по сравнению с EN 1990. Согласно ISO 2394 целевые показатели надежности связаны с последствиями отказа и относительными затратами на меры безопасности и основаны на критериях экономической оптимизации и индекса качества жизни [23, 24]. В соответствии с ISO 2394:1998, если возможный отказ конструкции не связан с человеческими жертвами, целевой уровень надежности может быть определен исключительно на основе экономической оптимизации. В противном случае для определения целевого уровня надежности необходимо применять подходы, основанные на анализе индивидуального или общественного риска, или индекса качества жизни. Далее более подробно рассмотрим каждый из подходов определения целевого значения индекса надежности.

Оценка целевых значений показателей надежности *на основе экономической оптимизации* представляет собой минимизацию ожидаемых общих затрат с учетом последствий отказа и мер безопасности в течение всего срока службы или иного рассматриваемого периода времени. Ожидаемые общие затраты можно рассматривать как

сумму ожидаемых затрат на возведение, техническое обслуживание, модернизацию, меры безопасности и затрат, связанных с отказом конструкции [25, 26, 27]. Как правило, затраты состоят из части, не зависящей от параметра принятия решения (затраты, связанные с обследованиями, восстановлением, администрированием, экономические потери из-за прерывания работы и т.д.) и части, зависящей от параметра принятия решения. Оценка стоимости отказа является очень важным, но, вероятно, самым сложным шагом в оптимизации затрат. Следует учитывать не только прямые последствия отказа (возникающие в результате отказов отдельных компонентов), но и последующие последствия (связанные с неисправностью всей конструкции, ограничением функциональности сооружения).

Оценка целевых значений показателей надежности *на основе рисков для безопасности человека* направлена на обеспечение приемлемых уровней риска для обитателей или пользователей сооружения по сравнению с другими видами повседневной деятельности. Годовая вероятность отказа не может превышать требований, основанных на критериях индивидуальной безопасности человека или группового риска. Маловероятно, что общественность согласится с более высокими показателями отказов чем те, которые связаны с максимально допустимыми значениями индивидуального или общественного риска, даже, если они основаны на рациональных критериях, например таких, как принцип минимальных затрат на спасение жизни [28].

Оценка целевых значений показателей надежности *на основе индивидуальных рисков* направлена на то, чтобы вероятность стать жертвой разрушения конструкции была меньше, чем вероятность смерти в результате несчастного случая. Вероятность смерти в результате несчастного случая в повседневной жизни в развитых странах составляет около 10^{-4} в год, поэтому ISO 2394:1998 предлагает назначать вероятность стать жертвой разрушения конструкции равной 10^{-6} . В исследовании [29] проанализировали риски для людей, связанные с текущей практикой в области строительных конструкций, и получили значения 10^{-6} и 10^{-5} в год соответственно для среднего и высокого класса ответственности конструкций. Однако современная практика дает ограниченные представления о приемлемых индивидуальных рисках, поскольку повседневное проектирование приводит к более высоким целевым уровням, чем необходимо для обеспечения безопасности человека [30]. Основываясь на концепции индивидуального риска, целевая вероятность отказа $P_{f,IR}$ определяется, исходя из условной вероятности несчастного случая при реализации отказа конструкции P_{clf} , посредством следующего выражения:

$$P_{f,IR} \leq 10^{-5} / P_{clf}, \quad (1)$$

Оценка базы данных об отказах конструкций, проведенная в исследовании [31], позволяет определить вероятность по крайней мере одного несчастного случая в случае отказа конструкции. Значение P_{clf} , равное 0.005, получено для жилых зданий, 0.01 – для коммерческих зданий, 0.03 – для промышленных объектов, 0.055 – для мостов. В исследовании [32] оценивают условные вероятности P_{clf} для высокого, среднего и низкого классов последствий, равными 0.3, 0.03 и 0.001 соответственно. При разрушении конструкции вероятность несчастного случая для отдельного человека (риск которого оценивается) может быть ниже, чем вероятность по крайней мере одного несчастного случая для любого пользователя, поскольку время пребывания человека в зоне обрушения конструкции может быть коротким. В случае зданий этот эффект пренебрежимо мал, но в случае мостов или инфраструктуры этот эффект играет доминирующую роль, и критерий индивидуального риска становится менее значительным.

Оценка целевых значений показателей надежности *на основе группового риска* направлена на ограничение отказов, сопровождаемых большим количеством погибших. Взаимосвязь между вероятностью наступления события и смертельными исходами хорошо описывается зависимостью следующего вида (ISO 2394:1998) [33]:

$$F(n) \leq A \cdot n^{-\alpha}, \quad (2)$$

где A и α – константы.

Значение α большее 1 используется для социально неодобряемых событий, т.е. сопровождающихся серьезными последствиями, в частности выраженными в числе смертельных исходов. В большинстве случаев приемлемые значения α находятся в диапазоне от 1 до 2, при этом наиболее часто применяемое значение $\alpha = 2$ [34]. Константа A представляет собой частоту возникновения события с $N \geq 1$ смертельным исходом. Чтобы избежать принятия иррациональных решений, определенный критерий приемлемости F - n также должен контролировать ожидаемое количество смертельных случаев $E(N)$ в течение рассматриваемого контрольного периода, что соответствует площади под линией приемлемости F - n [35]. В исследовании [29] на основе анализа текущей практики в области проектирования зданий приведены следующие значения константы A :

для “малонаселенных” зданий: $A = 2,6 \cdot 10^{-6}$;

для “густонаселенных” зданий: $A = 5,6 \cdot 10^{-6}$.

Рекомендации для оценки ожидаемого числа погибших в конкретном сценарии обрушения можно найти в исследовании [12]. В работе [29] представлены эмпирические зависимости для числа жертв n и площади обрушения A_{col} вследствие отказа элемента конструкции:

для “малонаселенных” зданий: $n = 0.27 \cdot A_{col}^{0.5} - 1 \geq 0$;

для “густонаселенных” зданий: $n = 0.59 \cdot A_{col}^{0.56} - 1 \geq 0$.

Соответствующая частота возникновения событий с $N \geq 1$ смертельными исходами может быть преобразована в целевые вероятности отказа ($P_{ft,SR}$) с использованием уравнения [29]:

$$P_{ft,SR} \approx A \cdot n^{-\alpha} / P_{N|f}, \quad (3)$$

где $P_{N|f}$ описывает условную вероятность $N = n$ смертельных исходов в случае отказа. Консервативно принимают $P_{N|f}$ равным P_{clf} [29].

Оценка целевых значений показателей надежности на основе индекса качества жизни, который учитывает затраты на меры безопасности по спасению жизни и прогнозируемое число погибших в случае разрушения конструкции. По сравнению с экономической оптимизацией этот подход приводит к меньшим значениям целевых показателей надежности, поскольку учитываются только человеческие последствия разрушения конструкции и не учитываются другие потери (экономические, экологические и т.д.) [10]. Результаты исследования [29] подтверждают, что применение подхода индекса качества жизни может привести к более высоким уровням риска по сравнению с текущей практикой проектирования в соответствии с Еврокодами. В исследовании [30] продемонстрировали, что минимальные уровни безопасности для человека в ISO 2394:1998 и подход индекса качества жизни в ISO 2394:2015 дают сопоставимые показатели надежности.

Стандарт ISO 2394 помимо описания самих методик оценки целевых значений показателей надежности содержит рекомендуемые значения. Для среднего класса последствий рекомендуется применять следующие значения индекса надежности:

- на основании экономической оптимизации: $\beta_1 = 4.2$ для периода отнесения один год при средних относительных затратах на меры безопасности и при средних экономических потерях (большинство жилых зданий). В пересчете на 50-летний период отнесения $\beta_{50} = 3.2$. Значения β корректируются с учетом уровня развития страны. Целевые показатели надежности β приведены в ISO 2394, являются ориентировочными только для развитых стран. Для стран, находящихся на стадии развития, более низкие значения β могут быть оправданы с учетом соответствующих социально-экономических параметров;
- на основании индекса качества жизни: $\beta_1 = 3.7$ для периода отнесения один год при средних относительных затратах на спасение жизни, в пересчете на 50-летний период отнесения $\beta_{50} = 2.55$.

Еще одним документом, на который стоит обратить внимание, является ASCE 7. Согласно ASCE 7 здания и сооружения классифицируют по четырем категориям риска в зависимости от количества людей, подверженных риску. Категория I связана с небольшим количеством лиц, подверженных риску, а категория IV - с десятками тысяч. Для III категории рекомендовано значение равное 3.75 для годового периода отнесения [36]. В пересчете на 50-летний период отнесения $\beta_{50} = 2.6$.

Результаты анализа численных значений индексов надежности для среднего класса последствий отказа сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Значения индексов надежности по разным нормативным документам.

Стандарт	$\beta(1 \text{ y.})$	$\beta(50 \text{ y.})$
EN 1990, 2002	4.7	3.8
ISO 2394 : 1998	4.1	3.1
ISO 2394 : 2015, на основе экономической оптимизации для развитых стран	4.2	3.2
ISO 2394 : 2015, на основе экономической оптимизации для развивающихся стран	3.3	2.3
ISO 2394 : 2015, на основе безопасности людей	3.7	2.55
ASCE 7-22	3.75	2.6

Как видно из представленного анализа, значения индексов надежности существенно отличаются в разных нормативных документах как с позиции численных значений, так и с позиции методик их назначения.

Выводы

Наиболее полная методика определения целевых значений вероятности отказа изложена в международном стандарте ISO 2394. Данный стандарт содержит указания по определению целевых индексов надежности на основе экономической оптимизации, анализа индивидуального или общественного риска, а также индекса качества жизни. Анализ нормируемых значений вероятностей отказа (индексов надежности), регламентированных в международных нормативных документах EN1990, ISO 2394-1998, ISO 2394-2015, ASCE 7-22, показал, что, исходя из безопасности людей, индекс надежности рекомендуется принимать не менее 3.7 для периода отнесения 1 год. При этом, исходя из экономической оптимизации (целевые показатели надежности представлены как функция затрат на меры по снижению риска и последствий в случае отказа), индекс надежности рекомендуется принимать не менее 4.2 для периода отнесения 1 год. Т.е. требования по более высокому индексу надежности обусловлены экономическими соображениями. Однако следует обратить внимание, что значения индекса надежности, исходя из экономической оптимизации, получены для развитых стран. Если страна относится к развивающийся, то рекомендуемое значение – 3.3 для периода отнесения 1 год. Поэтому в общем случае необходимо определять значения индекса надежности с учетом экономических особенностей конкретной страны.

Следует отметить, что принято считать, что существующая практика проектирования гарантирует безопасность строительных конструкций, и в существующих реалиях сообщество в неявном виде принимает эти уровни надежности. Данная ситуация позволяет также определить целевые индексы надежности на основании анализа предыдущей практики проектирования. Однако следует понимать, что данный подход является дополнительным, так как полученные таким образом значения индексов надежности будут не оптимальными для всех видов конструкции и условий применения.

В рассмотренных нормативных документах значения индексов надежности регламентированы для «нестареющих» конструктивных элементов, соответственно в тех случаях, когда деградация (возможно, контролируемая осмотрами и ремонтами) рассматривается как причина отказа, представляется разумным нормировать годовой целевой

индекс для самого неблагоприятного года, поскольку надежность конструкции в другие годы будет превышать этот целевой показатель. При этом значение индекса необходимо понизить, чтобы не быть чрезмерно консервативным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митасов В.М., Адищев В.В., Стаценко Н.В. Концепция предельных состояний и их проверка по российским нормам и Еврокодам // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. №8. С. 15-23.
2. Харченко А.О., Харченко А.А., Владецкая Е.А. Использование вероятностных методов оценки надежности технических объектов на примере технологических и автомобильных систем // Мир транспорта и технологических машин. 2019. № 4(67). С. 3-10.
3. Герасимов Е.П. Использование вероятностных методов для вычисления нормативной надежности по трещиностойкости железобетонных изгибаемых элементов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2018. № 1(44). С. 55-60.
4. Мкртычев О.В., Юрьев Р.В. Оценка надежности консольной плиты при действии повторяющихся землетрясений // Вестник МГСУ. 2010. № 3. С. 147-151.
5. Тамразян А.Г., Филимонова Е. А. Критерии формирования комплексной целевой функции железобетонной плиты с учетом анализа риска // Вестник МГСУ. 2013. № 10. С. 68-74.
6. Мкртычев О.В., Райзер В.Д. Теория надежности в проектировании строительных конструкций / Мкртычев О.В., Райзер В. Д. - Москва : Издательство АСВ, 2016. - 908 с.
7. Райзер В.Д. Очерк развития теории надежности и норм проектирования строительных конструкций // Сейсмостойкое строительство и безопасность сооружений. 2014. №2. С. 29-35.
8. Тамразян А.Г. Бетон и железобетон – проблемы и перспективы // Промышленное и гражданское строительство. 2014. №8. С. 30-33.
9. Уткин В.С., Соловьев С.А., Ярыгина О.В. Расчет несущих элементов конструкций по заданному значению надежности при неполной статистической информации // Строительство и реконструкция. 2020. № 1(87). С. 81-91. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-87-1-81-91.
10. Diamantidis D., Holický M., Sýkora M. Reliability and Risk Acceptance Criteria for Civil Engineering Structures // Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava Civil Engineering Series. 2016. Vol. 16. P. 1-10. DOI: 10.1515/tvsvb-2016-0008.
11. Diamantidis D., Sykora M. Reliability differentiation and uniform risk in standards: a critical review and a practical appraisal // Future Trends in Civil Engineering. 2019. P.242-260. DOI: 10.5592/CO/FTCE.2019.11.
12. Hingorani R., Tanner P., Prieto M., Lara C. Consequence classes and associated models for predicting loss of life in collapse of building structures. Structural Safety. 2020. Vol. 85. DOI: 10.1016/j.strusafe.2019.101910
13. Vrouwenvelder A. C. W. M. Target reliability as a function of the design working life // Structural engineering international. 2010. P. 62-65.
14. Тур В. В., Тур А.В., Дереченник С.С. О назначении требуемых мер надежности при разработке национальных нормативных документов по проектированию строительных конструкций // Вестник Брестского государственного технического университета. 2020. № 1. С. 2–15. Doi: 10.36773/1818-1212-2020-119-1-2-15.
15. Holický M., Diamantidis D., Sykora M. Reliability levels related to different reference periods and consequence classes. Beton- und Stahlbetonbau. 2018. Vol. 113. P. 22-26. <https://doi.org/10.1002/best.201800039>
16. Baravalle M., Köhler J. A risk-based approach for calibration of design codes // Structural Safety. 2019. Vol. 78. P. 63-75.
17. Meinen N.E., Steenbergen R.D.J.M. Reliability levels obtained by Eurocode partial factor design - A discussion on current and future reliability levels. Heron. 2018. Vol. 63(3). P. 243-301.
18. Тур В. В., Надольский В. В. Целевые значения показателей проектной надежности в рамках концепции надежности, принятой в европейских нормах (Еврокодах) // Проблемы современного бетона и железобетона. 2015. Вып. 7. С. 178 – 192.
19. Надольский В.В., Тур В.В. Калибровка (определение) частного коэффициента для снеговой нагрузки при расчетах стальных конструкций // Вестник Брестского государственного технического университета. 2013. № 1(79). С. 169–172.
20. Надольский В.В., Мартынов Ю.С. Оценка требуемого (целевого) уровня надежности на основании предыдущего опыта нормирования // Вестник Полоцкого государственного университета. 2014. № 8. С. 27–34.
21. Надольский В.В., Голицки М., Сикора М., Тур В.В. Сопоставление уровней надежности, обеспечиваемых нормами Российской Федерации и Евросоюза // Вестник МГСУ. 2013. № 6. С. 7–20. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.6.7-20.

22. Nadolski V.V., Holický M., Sýkora M. Comparison of the reliability levels provided by Eurocodes and by standards of the Republic of Belarus // Вестник МГСУ. 2013. № 2. С. 7–21.
23. Ditlevsen O., Friis-Hansen P. Life Quality Index an empirical or a normative concept? // International Journal of Risk Assessment and Management. 2007. Vol. 7. P. 895 - 921. DOI: 10.1504/IJRAM.2007.014666.
24. Pandey M.D., Nathwani J. Life Quality Index for the Estimation of Societal Willingness-to-Pay for Safety. Structural Safety. 2004. Vol. 26. 181-199. DOI: 10.1016/j.strusafe.2003.05.001.
25. Holický M. Optimisation of the target reliability for temporary structures // Civil Engineering and Environmental Systems. 2013. Vol. 30(2). P. 87-96.
26. Allen D.E. Limit states criteria for structural evaluation of existing buildings. Canadian Journal of Civil Engineering. 1991. Vol. 18(6). P. 995-1004.
27. Steenbergen R., Sýkora M., Diamantidis D., Holický M. Economic and human safety reliability levels for existing structures // Structural Concrete. 2015. Vol. 16(3). P. 323-332.
28. Fischer K., Virguez E., Sánchez-Silva M., Faber M.H. On the assessment of marginal life saving costs for risk acceptance criteria. Structural Safety. 2013. Vol. 44. P. 37–46. doi: 10.1016/j.strusafe.2013.05.00.
29. Tanner P., Hingorani R. Acceptable risks to persons associated with building structures. Structural Concrete. 2015. Vol. 16(3). Pp. 314-22.
30. Sýkora M., Diamantidis D., Holický M., Jung K. Target Reliability for Existing Structures Considering Economic and Societal Aspects // Structure and Infrastructure Engineering. 2017. Vol. 13. P. 181-194.
31. Eldukair Z.A., Ayyub B.M. Analysis of recent U.S. structural and construction failures // Journal of Performance of Constructed Facilities. 1991. Vol. 5. P. 57-73.
32. Steenbergen R.D.J.M., Vrouwenvelder A.C.W.M. Safety philosophy for existing structures and partial factors for traffic loads on bridges. Heron. 2010. Vol. 55(2). P. 123 – 139.
33. Vrijling J.K., van Gelder P.H.A.J.M., Ouwenkerk S.J. Criteria for acceptable risk in the Netherlands. // Infrastructure Risk Management Processes. 2005. P. 143-157. DOI: 10.1061/9780784408155.ch05.
34. Vrouwenvelder T., Scholten N. Assessment criteria for existing structures // Structural Engineering International. 2010. Vol. 20. P. 62-65.
35. Aven T., Heide B. Reliability and validity of risk analysis. Reliability Engineering & System Safety, 2009. Vol. 94(11). P. 1862-1868. DOI: 10.1016/j.res.2009.06.003
36. Cornell C., Jalayer F., Hamburger R., Foutch D. Probabilistic basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency steel moment frame guidelines. Journal of Structural Engineering ASCE. 2002. Vol. 128(4). p. 526–533.

REFERENCES

1. Mitasov V.M., Adishchev V.V., Stacenko N.V. Konceptiya predel'nyh sostoyanij i ih prover-ka po rossijskim normam i Evrokodam [The concept of limit states and their verification according to Russian norms and Eurocodes] *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo*. 2017. Vol.8. P. 15-23. (rus)
2. Harchenko A.O., Harchenko A.A., Vladeckaya E.A. Ispol'zovanie veroyatnostnyh metodov ocenki nadezhnosti tekhnicheskikh ob'ektov na primere tekhnologicheskikh i avtomobil'nyh sistem [The use of probabilistic methods for assessing the reliability of technical objects on the example of technological and automotive systems] *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*. 2019. Vol. 4(67). P. 3-10. (rus)
3. Gerasimov E.P. Ispol'zovanie veroyatnostnyh metodov dlya vychisleniya normativnoj nadezhnosti po treshchinostjokosti zhelezobetonnyh izgibaemyh elementov [The use of probabilistic methods for calculating the normative reliability of crack resistance of reinforced concrete bendable elements] *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2018. Vol. 1(44). P. 55-60. (rus)
4. Mkrtychev O.V., YU'rev R.V. Ocenka nadezhnosti konsol'noj plity pri dejstvii povtoryayu-shchihsya zemletryasenij [Assessment of the reliability of a cantilever plate under the action of repeated earthquakes] *Vestnik MGSU*. 2010. Vol. 3. P. 147-151. (rus)
5. Tamrazyan A.G., Filimonova E. A. Kriterii formirovaniya kompleksnoj celevoj funkicii zhelezobetonnoj plity s uchetom analiza riska [Criteria for the formation of a complex target function of a reinforced concrete slab taking into account risk analysis] *Vestnik MGSU*. 2013. Vol. 10. P. 68-74. (rus)
6. Mkrtychev O.V., Rajzer V.D. Teoriya nadezhnosti v proektirovanii stroitel'nyh konstrukcij [Theory of reliability in the design of building structures] / Mkrtychev O.V., Rajzer V. D. - Moskva : Izdatel'stvo ASV, 2016. 908 p. (rus)
7. Rajzer V.D. Ocherk razvitiya teorii nadezhnosti i norm proektirovaniya stroitel'nyh konstrukcij [An essay on the development of the theory of reliability and standards of design of construction structures] *Sejsmostojkoe stroitel'stvo i bezopasnost' sooruzhenij*. 2014. No2. P. 29-35. (rus)
8. Tamrazyan A.G. Beton i zhelezobeton – problemy i perspektivy [Concrete and reinforced concrete – problems and prospects] *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2014. Vol.8. P. 30-33. (rus)

9. Utkin V.S., Solov'ev S.A., Yarygina O.V. Raschet nesushchih elementov konstrukcij po zadan-nomu znacheniyu nadezhnosti pri nepolnoj statisticheskoj informacii [Calculation of load-bearing structural elements according to a given reliability value with incomplete statistical information] *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2020. Vol. 1(87). P. 81-91. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-87-1-81-91. (rus)
10. Diamantidis D., Holický M., Sýkora M. Reliability and Risk Acceptance Criteria for Civil Engineering Structures. *Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava Civil Engineering Series*. 2016. Vol. 16. P. 1-10. DOI: 10.1515/tvsb-2016-0008.
11. Diamantidis D., Sykora M. Reliability differentiation and uniform risk in standards: a critical review and a practical appraisal. *Future Trends in Civil Engineering*. 2019. P.242-260. DOI: 10.5592/CO/FTCE.2019.11.
12. Hingorani R., Tanner P., Prieto M., Lara C. Consequence classes and associated models for predicting loss of life in collapse of building structures. *Structural Safety*. 2020. 85. DOI: 10.1016/j.strusafe.2019.101910
13. Vrouwenvelder A. C. W. M. Target reliability as a function of the design working life . *Structural engineering international*. 2010. P. 62-65.
14. Tur V.V., Tur A.V., Derechennik S.S. O naznachenii trebuemyh mer nadezhnosti pri razra-botke nacional'nyh normativnyh dokumentov po proektirovaniyu stroitel'nyh konstrukcij [On the appointment of required reliability measures in the development of national regulatory documents on the design of building structures]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020. Vol. 1. P. 2–15. Doi: 10.36773/1818-1212-2020-119-1-2-15. (rus)
15. Holický M., Diamantidis D., Sykora M. Reliability levels related to different reference periods and consequence classes. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2018. Vol. 113. P. 22-26. DOI: 10.1002/best.201800039
16. Baravalle M., Köhler J. A risk-based approach for calibration of design codes. *Structural Safety*. 2019. Vol. 78. p. 63-75.
17. Meinen N.E., Steenbergen R.D.J.M. Reliability levels obtained by Eurocode partial factor design - A discussion on current and future reliability levels. *Heron*. 2018. Vol. 63. No. 3. pp. 243-301.
18. Tur V. V., Nadol'skij V. V. Celevye znacheniya pokazatelej proektnoj nadezhnosti v ramkah koncepcii nadezhnosti, prinyatoj v evropejskikh normah (Evrokodah) [Target values of design reliability indicators within the framework of the reliability concept adopted in European standards (Eurocodes)] . *Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona*. 2015. Vyp. 7. P. 178 – 192. (rus)
19. Nadol'skij V.V., Tur V.V. Kalibrovka (opredelenie) chastnogo koeficienta dlya snegovoj nagruzki pri raschetah stal'nyh konstrukcij [Calibration (determination) of the partial coefficient for snow load in calculations of steel structures] *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2013. Vol. 1(79). P. 169–172. (rus)
20. Nadol'skij V.V., Martynov YU.S. Ocenka trebuemogo (celevogo) urovnya nadezhnosti na os-novanii predydushchego opyta normirovaniya [Assessment of the required (target) level of reliability based on previous rationing experience] . *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014. Vol. 8. P. 27–34. (rus)
21. Nadol'skij V.V., Golicki M., Sikora M., Tur V.V. Sopostavlenie urovnej nadezhnosti, obespechivaemyh normami Rossijskoj Federacii i Evrosoyuza [Comparison of reliability levels provided by the norms of the Russian Federation and the European Union] . *Vestnik MGSU*. 2013. Vol. 6. P. 7–20. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.6.7-20. (rus)
22. Nadolski V.V., Holický M., Sýkora M. Comparison of the reliability levels provided by Eurocodes and by standards of the Republic of Belarus . *Vestnik MGSU*. 2013. Vol. 2. C. 7–21.
23. Ditlevsen O., Friis-Hansen P. Life Quality Index an empirical or a normative concept? *International Journal of Risk Assessment and Management*. 2007. Vol. 7. P. 895 - 921. DOI: 10.1504/IJRAM.2007.014666.
24. Pandey M.D., Nathwani J. Life Quality Index for the Estimation of Societal Willingness-to-Pay for Safety. *Structural Safety*. 2004. Vol. 26. 181-199. DOI: 10.1016/j.strusafe.2003.05.001.
25. Holický M. Optimisation of the target reliability for temporary structures . *Civil Engineering and Environmental Systems*. 2013. Vol. 30. No. 2. P. 87-96.
26. Allen D.E. Limit states criteria for structural evaluation of existing buildings. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1991. Vol. 18. No. 6, P. 995-1004.
27. Steenbergen R., Sýkora M., Diamantidis D., Holický M. Economic and human safety reliability levels for existing structures . *Structural Concrete*. 2015. Vol. 16. No. 3. P. 323-332.
28. Fischer K., Virguez E., Sánchez-Silva M., Faber M.H. On the assessment of marginal life saving costs for risk acceptance criteria. *Structural Safety*. 2013. Vol. 44. P. 37–46. doi: 10.1016/j.strusafe.2013.05.00.
29. Tanner P., Hingorani R. Acceptable risks to persons associated with building structures. *Structural Concrete*. 2015. Vol. 16(3). Pp. 314-22.
30. Sýkora M., Diamantidis D., Holický M., Jung K. Target Reliability for Existing Structures Considering Economic and Societal Aspects . *Structure and Infrastructure Engineering*. 2017. Vol. 13. No. 1. P. 181-194.
31. Eldukair Z.A., Ayyub B.M. Analysis of recent U.S. structural and construction failures . *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 1991. Vol. 5. No. 1. P. 57-73.

32. Steenbergen R.D.J.M., Vrouwenvelder A.C.W.M. Safety philosophy for existing structures and partial factors for traffic loads on bridges. *Heron*. 2010. Vol. 55(2). P. 123 – 139.
33. Vrijling J.K., van Gelder P.H.A.J.M., Ouwenkerk S.J. Criteria for acceptable risk in the Netherlands. *Infrastructure Risk Management Processes*. 2005. pp. 143-157. DOI: 10.1061/9780784408155.ch05.
34. Vrouwenvelder T., Scholten N. Assessment criteria for existing structures . *Structural Engineering International*. 2010. Vol. 20. No. 1, pp. 62-65.
35. Aven T., Heide B. Reliability and validity of risk analysis. *Reliability Engineering & System Safety*. 2009. Vol. 94(11). P. 1862-1868. DOI: 10.1016/j.ress.2009.06.003
36. Cornell C., Jalayer F., Hamburger R., Foutch D. Probabilistic basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency steel moment frame guidelines. *Journal of Structural Engineering ASCE*. 2002. Vol. 128(4). p. 526–533.

Информация об авторе:

Надольский Виталий Валерьевич

УО «Брестский государственный технический университет» (БрГТУ), г. Брест, Республика Беларусь, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии строительного производства» и доцент кафедры «Строительных конструкций», Белорусский национальный технический университет (БНТУ), г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: nadolskivv@mail.ru

Information about author:

Nadolski Vitali V.

Brest State Technical University, Brest, Belarus, candidate of technical science (PhD), docent, associated professor of the department of Building constructions, and Associate Professor of the Department of Building Structures, Belarusian National Technical University (BNTU), Minsk, Republic of Belarus
E-mail: nadolskivv@mail.ru

ВУ НГОК ТУЕН¹, Н.В. ФЕДОРОВА¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
(НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

ДИНАМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО КАРКАСА ЗДАНИЯ ПРИ СЦЕНАРИИ УДАЛЕНИЯ КОЛОННЫ

Аннотация. В статье представлен простой, но эффективный метод оценки динамического отклика железобетонной конструкции при внезапном удалении несущей колонны. Локальная область над разрушенной колонной моделируется в виде двухпролетной балки с сосредоточенной массой m , расположенной в середине балки. Процесс удаления несущей средней колонны моделируется путем снижения значения внутреннего усилия $R(t)$ в данной колонне до нуля за определенный короткий промежуток времени t_r . Основываясь на предложенной модели, находим динамическое перемещение во времени точки, в которой находится сосредоточенная масса. Полученные результаты представляют интерес для решения прикладных задач, связанных с проблемой живучести, защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения, в частности при определении критериев деформативности железобетонных конструкций при особом напряженном состоянии.

Ключевые слова: динамическая оценка, модель с одной степенью свободы (SDOF), удаление колонны, прогрессирующее обрушение, коэффициент динамичности, демпфирование.

VU NGOC TUYEN¹, N.V. FEDOROVA¹¹ Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

DYNAMIC RESPONSE OF REINFORCED CONCRETE BUILDING FRAME UNDER COLUMN REMOVAL SCENARIO

Abstract. The paper presents a simple but effective method for assessing the dynamic response of a reinforced concrete structure under sudden removal of a load-bearing column. The local region above the failed column is modeled as a two-span beam with a concentrated mass m located in the middle of the beam. The removal process of the load-bearing middle column is modeled by reducing the value of the internal force $R(t)$ in this column to zero in a certain short period of time t_r . Based on the proposed model, we find the dynamic displacement in time of the point where the concentrated mass is located. The obtained results are of interest for solving applied problems related to the problem of survivability, protection of buildings and structures from progressive collapse, in particular in determining the criteria for the deformability of reinforced concrete structures under a special stress state.

Keywords: dynamic response, single-degree-of-freedom (SDOF) model, column-removal scenario, progressive collapse, dynamic amplification factor, damping, column removal time.

Введение

Прогрессирующее обрушение строительной конструкции – явление, при котором начальный локальный сбой приводит к полному или непропорционально большому коллапсу и несет ответственность за подавляющее большинство происходящих трагических аварий. При этом в здании происходит локальное разрушение одного из несущих элементов, приводящее к разрушению соседних конструкций, что, в свою очередь, влечет за собой обрушение всего здания [1].

За последние несколько десятилетий во всем мире произошло множество прогрессирующих обрушений различных зданий, повлекших за собой огромные человеческие жертвы и материальные потери.

© Ву Нгок Туен, Фёдорова Н.В., 2024

Одним из широко известных в научной литературе примеров является обрушение здания Ронан-Пойнт в 1968 году, в результате которого погибли 4 и получили ранения 17 человек [2]. Это событие вызвало большое внимание в инженерном сообществе, и как следствие нашло отражение в строительных нормах и стандартах многих стран, в которые начали включать положения, обеспечивающие структурную целостность и способы защиты зданий от прогрессирующего разрушения [3–5]. В качестве основного способа защиты в этих нормах рассматривается метод альтернативного пути нагрузки для оценки прочности конструкции против прогрессирующего разрушения. Этот метод основан на анализе поведения конструкции после удаления из нее одного из несущих элементов.

Для понимания сложных процессов, происходящих при прогрессирующем обрушении конструктивной системы к настоящему времени выполнено ряд экспериментальных исследований на моделях и натурных конструкциях при квазистатическом нагружении. Наиболее часто моделирование поведения конструкции изучалось при потере одного из несущих элементов [6–10]. Эти испытания являются достаточно надежным и эффективным способом исследования проблем разрушения конструкций и дают нам общее представление о характеристиках разрушения, а также о несущей способности конструктивной системы. Однако они не всегда отражают динамическую природу процесса прогрессирующего разрушения и не позволяют оценивать влияние скорости деформирования на поведение конструкций. Чтобы преодолеть отмеченные недостатки, было проведено несколько экспериментов в динамической постановке [11–13]. При этом, анализируя их, можно видеть, что по сравнению с квазистатическими испытаниями динамические эксперименты отличаются большей сложностью требуют более дорогостоящих машин и оборудования.

Другим, достаточно распространенным методом анализа процессов деформирования и разрушения конструктивных систем зданий и сооружений в запредельных состояниях, является нелинейный динамический анализ зданий и сооружений при сценариях удалении несущих конструкций, основанный на методе конечных элементов или других численных методах [14–16]. Этот вариант исследований рассматриваемых процессов требует, чтобы при расчете реальных сложных конструкций используемый компьютер был достаточно мощным, а главное – чтобы инженер-конструктор имел навыки использования специализированного программного обеспечения и высокий уровень подготовки для анализа выходные результаты.

Из полученных квазистатическими испытаниями результатов [6–10] выделяется четыре механизма сопротивления обрушению каркасов железобетонных зданий. Первоначально, когда нагрузка, приложенная к конструктивной системе, невелика, ригели каркаса над поврежденной колонной деформируются как изгибаемая конструкция (изгибная стадия). При более высоких нагрузках перемещение конструкции увеличивается, в растянутой зоне появляются трещины, и эти трещины увеличиваются в направлении сжатой зоны бетона, образуя таким образом сводчатую конструкцию в балке (стадия арочного эффекта). Поскольку в рамной системе каркаса горизонтальному перемещению рассматриваемых железобетонных балок препятствуют соседние балочные элементы, арочный эффект значительно увеличивает несущую способность конструкции. При дальнейшем увеличении нагрузки, действующей на конструкцию, высота несущей арки постепенно уменьшится до нуля, затем рассматриваемая железобетонная балка переходит в вантовый механизм (стадия вантового эффекта). В этом состоянии несущая способность балки обеспечивается за счет работы на растяжения всей имеющейся в конструкции ригеля арматуры. Опираясь на эти результаты, было предложено множество аналитических или полуаналитических моделей для объяснения и прогнозирования несущей способности конструкций, а также для определения соответствующего перемещения каждого механизма сопротивления прогрессирующего обрушения в запредельных состояниях. Сравнение с экспериментальными результатами квазистатических испытаний показывает, что эти модели относительно точно отражают работу конструкции при сценарии удаления колонны.

Близким к рассмотренным подходам к оценке динамических свойств конструкций для их защиты от прогрессирующего обрушения и достаточно строгим является энергетический подход, предложенный и развитый во многих исследованиях, таких, например, как [17–19]. Динамический отклик конструкции рассчитывается на основе статической нелинейной зависимости нагрузки и перемещении конструкции и условия баланса энергии между работой внешних нагрузок и запасенной внутренней энергией при деформации конструкции после удаления несущей колонны. Конечно, полученные таким образом аналитические зависимости также не могут оценить влияние скорости деформации на динамическую прочность материалов железобетонных конструкций.

Как уже отмечалось, прямой нелинейный динамический анализ конструктивных систем довольно трудоемок и по разным причинам не всегда доступен практикующим инженерам. В связи с этим, квазистатический анализ параметров живучести конструкций с учетом коэффициента динамичности нагрузки для получения эквивалентного состояния конструкции при сценарии внезапного удаления несущей колонны, привлекает внимание многих ученых и инженеров [20–22].

Принципиально иной, все более продвигаемый в научных публикациях подход к изучению проблемы живучести строительных конструкций заключается в использовании показателей надежности/риска, так называемого вероятностного подхода. Так, в своем исследовании Xu и Ellingwood оценили прочность стальных каркасов, которые были типичны для строительства в сейсмических зонах до землетрясения в Northridge 1991 года и которые сопротивлялись прогрессирующему обрушению, путем разработки вероятностной модели разрушения узловых соединений [23]. Здесь следует понимать, что такие величины, как нагрузка, приложенная к конструкции, а также несущая способность конструкции являются неопределенными величинами. Чтобы учесть эту неопределенность, Brunesi и Parisi использовали метод Монте-Карло для создания двумерной (2D) и трехмерной модели конструкции при расчетном анализе живучести здания против прогрессирующего обрушения [24]. В этом исследовании предложены регрессионные модели для прогнозирования прироста динамической нагрузки.

Существует относительно небольшое количество исследований, посвященных применению инструментов строительной динамики для решения проблемы динамического поведения конструкции при сценарии удаления несущей колонны. Jian Weng и его коллеги предложили линейную модель с одной степенью свободы учитывающую затухание колебаний [25]. К сожалению, решение динамического отклика, данное вышеупомянутыми авторами на основе приведенной выше модели, имеет некоторые методологические неточности. Jun Yu и его коллеги предложили нелинейную модель с одной степенью свободы, в которой жесткость является функцией, зависящей от перемещения [26] [27]. Эти модели достаточно универсальны, эффективны в практических расчетах и способны описывать различные механизмы сопротивления прогрессирующему обрушению конструкции. Но в этих исследованиях не уделено должного внимания влиянию таким важным параметрам при анализе живучести как время удаления колонны, изменение жесткости элементов конструктивной системы при статико-динамическом нагружении и диссипации энергии конструкции на ее динамический отклик.

В данной статье представлен метод оценки динамического отклика железобетонного каркаса многоэтажного здания, подвергшихся внезапному удалению несущей конструкции. На основе эквивалентной модели системы с одной степенью свободы аналитическим методом определено перемещение в конструктивной системе после удаления колонны. При этом в рассматриваемой физически и конструктивно нелинейной системе учитываются изменяющиеся при нагружении и образовании трещин параметры жесткости элементов конструкции. С использованием принятого условия эквивалентности получены аналитические

выражения в удобном для приведения исходной системы с произвольным числом степеней свободы к расчетной модели с одной степенью свободы. Сосредоточенная масса, изгибная жесткость и коэффициент демпфирования определяются на основе эквивалентной расчетной схемы системы, а также установленной зависимости «нагрузка- перемещение» при медленном удалении колонны (квазистатическая задача).

Модели и методы

Построение расчетной модели с одной степенью свободы для определения динамического отклика конструкций

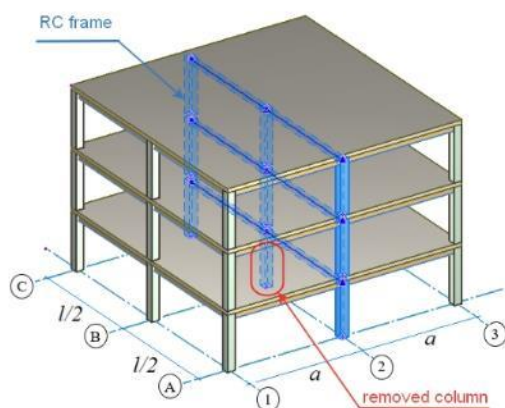
Рассмотрим процесс деформирования железобетонной конструктивной системы каркаса многоэтажного здания при сценарии удалении средней несущей- колонны В1 (Рисунок 1). Согласно стандартам GSA и DoD, совокупность нагрузок, действующих на перекрытия этажей, назначаемых для расчета живучести зданий и сооружений против прогрессирующего обрушения, рассчитывается по формуле $DL+0,25LL$, в которой DL и LL - статическое и временное нагружение, соответственно. Значение нагрузки q рассчитывается по формуле:

$$q=a(DL+0,25LL), \quad (1)$$

где a – шаг несущих плоских рам рассматриваемого направления (Рисунок 1,а).

Принимается также, что до стадии удаления колонны при нормальном режиме работы конструкции перемещение точки над удаляемой колонной (Рисунок 1,б) вследствие осевого сжатия колонн по высоте каркаса здания относительно мало и им можно пренебречь. В начальный момент времени под действием распределенной нагрузки q в средней шарнирно подвижной опоре возникает опорная реакция. Значение опорной реакции зависит от граничных условий рассматриваемой балочной подконструкции и определяется классическими методами строительной механики, например, методом сил. В случае балки с двумя концами в виде жесткого защемления P_0 имеет величину $ql/2$. Во многих недавних исследованиях по прогрессирующему обрушению, например [28–30] внезапный выход из строя несущей колонны моделируется мгновенным уменьшением значения P_0 до нуля. В реальных эксплуатационных зданиях и сооружениях, аварийное разрушение колонны может быть вызвано различными причинами и может быть медленным или быстропротекающим процессом. Это вызывает неопределенность рассматриваемого особого или аварийного воздействия.

а)



б)

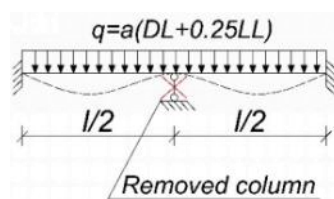


Рисунок 1 - Двухуровневая модель железобетонного каркаса здания в зоне возможного локального разрушения: а - схема каркаса при сценарии удаления средней колонны В1; б)- расчетная схема подконструкции второго уровня для определения перемещения над удаляемой колонной

Несложно видеть, что внутреннее усилие P_0 в колонне будет потеряно через определенный промежуток времени t_r . Тогда моделирование разрушения несущей колонны путем мгновенного уменьшения значения P_0 до нуля не полностью отражает реальную работу конструкции. И в этом смысле представляется важным метод оценки динамического отклика рассматриваемой балочной подконструкции над удаляемой колонной в виде двухпролетной балки с учетом времени разрушения колонны t_r (Рисунок 2,а). При удалении средней колонны внутреннее усилие в ней постепенно уменьшается от значения P_0 до нуля за период времени t_r . Критерии описывающие изменение во времени внутренней силы в разрушенной колонне $R(t)$, представлен на рисунке 2, а. Рассматриваемый процесс двух этапного статико-динамического нагружения конструкции по времени можно представить двумя состояниями: статическим – до удаления колонны и динамическим - в момент удаления колонны. Расчетная схема на рисунке 2,б описывает поведение подконструкции до разрушения колонны под действием эксплуатационной статической нагрузки, а схема рисунка 2,в описывает движение конструктивной системы вокруг нового положения равновесия после разрушения колонны под действием динамической силы $P(t)$.

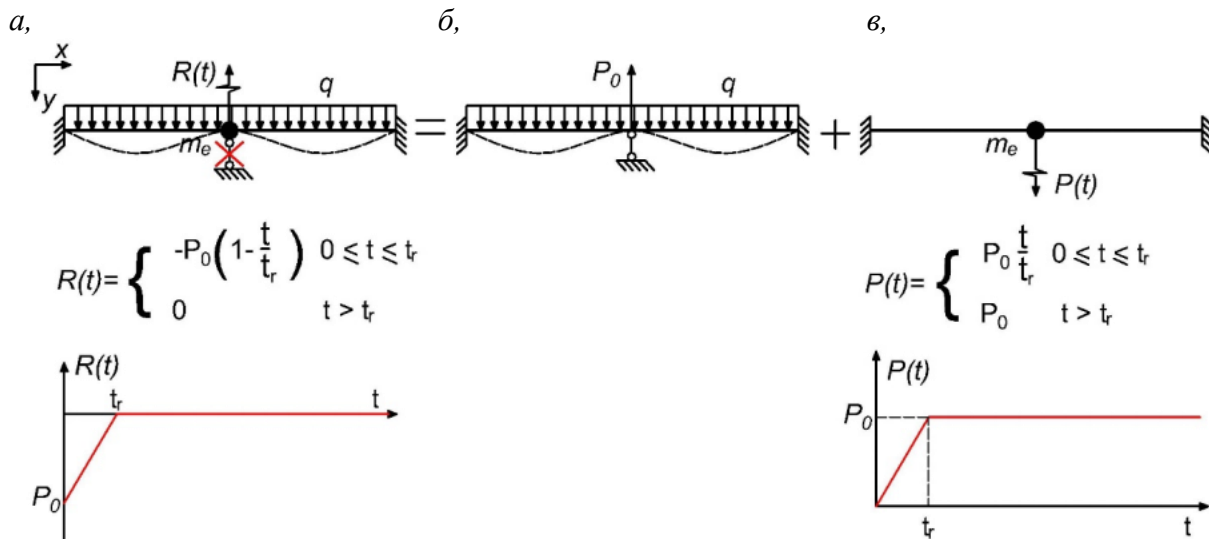


Рисунок 2 - Расчетная модель для описания динамического отклика системы до и после разрушения колонны (а) и отдельные модели для описания статического состояния до разрушения колонны (б) и динамического состояния после разрушения колонны (в)

Рассмотрим расчетную модель на рисунке 2,в, описывающую движение подконструкции на этапе ее динамического догружения. Сосредоточенная динамическая нагрузка $P(t)$, приложенная к балке в точке сосредоточенной массы, определяется формулой

$$P(t) = \begin{cases} P_0 t / t_r & t \leq t_r, \\ P_0 & t > t_r. \end{cases} \quad (2)$$

Зависимость (2) для динамической нагрузки имеет следующие характеристики. На первом этапе $P(t)$ линейно возрастает от 0 до значения, равного значению внутренней реакции в колонне до начала ее разрушения P_0 через определенный промежуток времени t_r . Уравнение колебаний системы с одной степени свободы и эквивалентной сосредоточенной массе m_e под действием динамической нагрузки $P(t)$ записывается в виде

$$m_e \ddot{u}(t) + c_e \dot{u}(t) + k_e u(t) = P(t), \quad (3)$$

где m_e, c_e, k_e - соответственно представляют эквивалентную массу, эквивалентный коэффициент сопротивления и эквивалентную жесткость системы с одной степенью свободы;

символы $\ddot{\cdot}$ и $\dot{\cdot}$ представляют собой производные второго и первого порядка от перемещения точки над удаляемой колонной u по времени t соответственно; $P(t)$ – динамическая нагрузка, действующая на систему.

Определение эквивалентной массы m_e конструктивной системы

Для приведения исходной динамической системы каркаса здания с произвольным числом степеней свободы к эквивалентной расчетной модели с одной степенью свободы мы приведем массу $m(x)$, распределенную по балке в эквивалентную сосредоточенную массу m_e , опираясь на гипотезу равенства максимальных кинетических энергий исходной и обобщенной моделей. Для этого необходимо заранее знать форму колебания системы. Решение Фурье для перемещения системы с бесконечным числом степеней свободы по времени записывается как произведение двух функций $u(x,t)=u(x)f(t)$. Взяв производную по времени от этой функции, получим формулу для определения скорости перемещения:

$$v(x,t) = \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = u(x) \frac{df(t)}{dt} \quad (4)$$

Зная скорость, можно записать выражение кинетической энергии для системы с распределенной массой $m(x)$:

$$K_p = \frac{1}{2} \int_0^l m(x) \cdot v^2(x,t) dx = \frac{1}{2} \left[\frac{df(t)}{dt} \right]^2 \int_0^l m(x) \cdot u^2(x) dx \quad (5)$$

Далее рассмотрим ту же балочную систему с сосредоточенной массой m_e , расположенной в середине балки. Перемещение точки приложения сосредоточенной массы определяется выражением $u(x,t) = u_{max}f(t)$, где u_{max} – амплитуда колебаний заданной точки приложения сосредоточенной массы m_e . Скорость колебаний этой точки имеет вид

$$v_1 = \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = u_{max}(x) \frac{df(t)}{dt} \quad (6)$$

Кинетическая энергия эквивалентной системы с сосредоточенной массой m_e определится из выражения:

$$K_c = \frac{1}{2} m_e v_1^2 = \frac{1}{2} m_e u_{max}^2 \left[\frac{df(t)}{dt} \right]^2 \quad (7)$$

Балка с сосредоточенной массой m_e считается эквивалентной балке с распределенной массой $m(x)$, когда кинетические энергии их движения равны, т.е.:

$$K_p = K_c \quad (8)$$

Из выражения (8) находим значение эквивалентной сосредоточенной массы m_e системы с одной степенью свободы:

$$m_e = \frac{\int_0^l m(x) \cdot v^2(x,t) dx}{u_{max}^2} \quad (9)$$

Поскольку форма колебаний $u(x)$ в задаче все еще неизвестна, в первом приближении на этом этапе расчета нам необходимо дать ее приближенное описание используя граничные условия системы. Удобнее всего функцию $u(x)$ выразить через u_{max} . Тогда это значение u_{max} в формуле (9) сократится. В итоге мы получим значение эквивалентной сосредоточенной массы в зависимости от распределенной массы и длины балки.

После определения эквивалентной сосредоточенной массы m_e по формуле (9) расчет сложной конструктивной системы сводится к расчету простой системе с одной степенью свободы.

Определение эквивалентной жесткости

При приведении исходной динамической системы с произвольным числом степеней свободы к расчетной модели с одной степенью свободы важным в комбинации условий эквивалентности является задача определения эквивалентной жесткости рассматриваемой железобетонной подконструкции неразрезной балки. Под действием динамической нагрузки перемещение подконструкции зависит от многих факторов, таких как способность к рассеиванию энергии, нелинейные характеристики железобетона и эффект скорости деформирования. Однако, сопоставляя экспериментальные результаты квазистатических [6–10] и динамических [11–13] экспериментов можно видеть качественное сходство закона изменения перемещений, картины образования и развития трещин и картин разрушения конструкций. Поэтому при определении эквивалентной жесткости для оценки динамического отклика конструкции при удалении колонны, авторы использовали данные диаграмм «нагрузка-перемещение», полученные из квазистатических испытаний. Эквивалентную жесткость k_e системы на заданном уровне статической нагрузки P_0 , приложенной к системе, и соответствующему этой нагрузке перемещению $(u_{st})_0$ можно определить по формуле (Рисунок 4):

$$k_e = \frac{P_0}{(u_{st})_0} \quad (10)$$

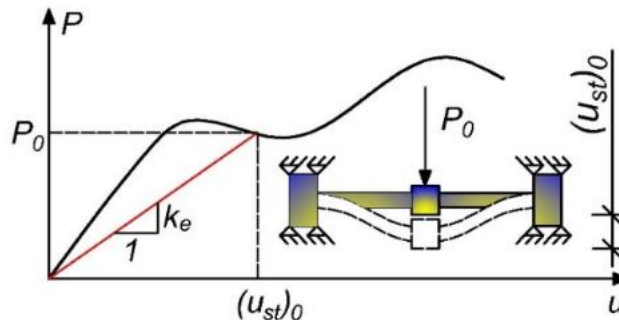


Рисунок 3 - К определению эквивалентной жесткости железобетонной подконструкции

Из рисунка 3 видно, что k_e является секущий модуль деформации данной подконструкции, т.е. $k_e = k_{sec}$.

Определение коэффициента демпфирования подконструкции с одной степенью свободы

Уравнение (3) колебаний системы с одной степенью свободы перепишем следующим образом:

$$\ddot{u}(t) + 2\xi_e\omega_n\dot{u}(t) + \omega_n^2u(t) = \frac{P(t)}{m_e} \quad (11)$$

где $\omega_n = \sqrt{k_e/m_e}$ – собственная частота системы без учета демпфирования; ξ_0 – эквивалентный коэффициент демпфирования.

Согласно стандарту АТС-40 (АТС 1996) [31], эквивалентный коэффициент демпфирования неупругой системы, подверженной сейсмическим нагрузкам, определяется как сумма коэффициента упругого демпфирования ξ_0 и коэффициента гистерезисного демпфирования ξ_{hys} :

$$\xi_e = \xi_0 + \xi_{hys} \quad (12)$$

Уместно заметить, что коэффициент упругого демпфирования (ξ_0) достаточно глубоко изучен в исследованиях Priestley и Grant [32] и в действующих стандартах (АТС-40) [31] принят равным 5% даже когда конструкция работает в упругой стадии.

При высоком уровне нагружения железобетонной конструкции, работающей с трещинами, когда значение P_0 настолько велико, что оставшиеся конструкции после удаления колонны в некоторых сечениях начинают течь и близки к последующему переходу в состояние сопротивления как висячей системы коэффициент ξ_e увеличивается по мере увеличения деформаций конструкции. Поэтому, помимо упругого демпфирования, в формуле эквивалентного коэффициента демпфирования (12) учитывается коэффициент гистерезисного демпфирования ξ_{hys} . Для расчета этого коэффициента предложено множество моделей, в основном основанных на соотношении накопленной энергии и диссипируемой энергии для неупругих систем [33,34]. При этом достаточно общая модель коэффициента гистерезисного демпфирования была разработана при исследовании железобетонных колонн, подвергающихся сдвигу, на основе нелинейного регрессионного анализа большого количества экспериментальных результатов [35]. В результате выражение для коэффициента гистерезисного демпфирования ξ_{hys} представлено в следующем виде:

$$\xi_{hys} = \frac{0,074 \ln \mu}{[1 - 0,744 \left(\frac{k_{sec}}{k_y} \right)^{0,129}] \mu^{0,383}} \quad (13)$$

где μ - соотношение между максимальным перемещением системы Δ_P и перемещением, соответствующим пределу текучести Δ_y ($\mu = \Delta_P / \Delta_y$); k_y и k_{sec} представляет собой начальную упругую жесткость и секущую жесткость, соответствующую точке $(\Delta_P; \Delta_y)$ на билинейной диаграмме (Рисунок 4).

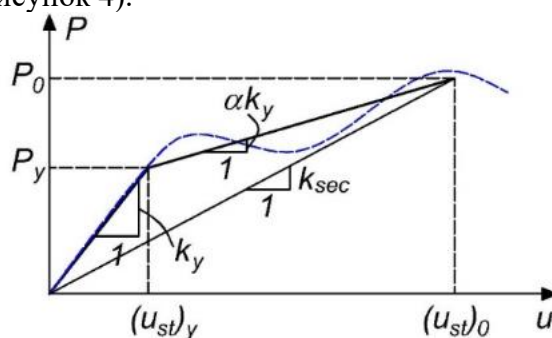


Рисунок 4 - К определению эквивалентного коэффициента демпфирования железобетонной подконструкции

Следует отметить, что зависимость (13) была получена применительно к расчету железобетонной конструкции на сейсмическое воздействие и лишь в первом приближении может быть использована при рассматриваемом ударном воздействии на рассматриваемую подконструкцию, поскольку она не вполне отражает реальное поведение подконструкции на различных стадиях деформирования особенно в стадии работы конструкции как ванта.

Результаты исследования и их анализ

После определения исходных параметров уравнения (11), таких как эквивалентная масса m_e , эквивалентная жесткость k_e и коэффициент демпфирования ξ_e решение этого уравнения для нахождения динамической реакции $u(t)$ системы в зависимости от времени можно выполнить с помощью интеграла Дюамеля [35]:

$$u(t) = \frac{1}{m_e \omega_D} \int_0^t P(\tau) e^{-\xi_e \omega_n (t-\tau)} \sin[\omega_D (t-\tau)] d\tau \quad (14)$$

где $\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \xi_e^2}$ – собственная частота затухающих колебаний.

Отклик системы с одной степенью свободы от состояния покоя до времени $t = t_\gamma$ (фаза линейного изменения динамической нагрузки $P(t)$) определится по формуле:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= \frac{P_0}{m_e \omega_D t_\gamma} \int_0^t P(\tau) e^{-\xi_e \omega_n (t-\tau)} \sin[\omega_D (t-\tau)] d\tau \\ &= (u_{st})_0 \left[\frac{t}{t_\gamma} - \frac{1-2\xi_e^2}{\omega_D t_\gamma} e^{-\xi_e \omega_n (t-\tau)} \sin \omega_D t \right. \\ &\quad \left. - \frac{2\xi_e}{\omega_n t_\gamma} (1 - e^{-\xi_e \omega_n t} \cos \omega_D t) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

где $(u_{st})_0$ – перемещение подконструкции при действии статической нагрузки P_0 .

Когда $t > t_\gamma$, динамический отклик системы на фазе постоянного значения динамической нагрузки может быть определен путем применения интеграла Дюамеля после подстановки значения $P(t)$ из уравнения (2) в уравнение (14). Мы также можем воспользоваться другим способом получения решения уравнения (11) следующим образом. Решением уравнения (11) является комбинация свободных колебаний и вынужденных колебаний под действием внезапной ударной нагрузки $P = P_0$ в момент времени $t = t_\gamma$:

$$\begin{aligned} u_2(t) &= e^{-\zeta_e \omega_n (t-t_r)} \left[u_1(t) \cos \omega_D (t-t_r) + \frac{\dot{u}_1(t_r) + \zeta_e \omega_n u_1(t_r)}{\omega_D} \sin \omega_D (t-t_r) \right] \\ &\quad + (u_{st})_0 \left\{ 1 - e^{-\zeta_e \omega_n (t-t_r)} \left[\cos \omega_D (t-t_r) + \frac{\zeta_e}{\sqrt{1-\zeta_e^2}} \sin \omega_D (t-t_r) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (16)$$

где $u_1(t_r)$ и $\dot{u}_1(t_r)$ – соответственно перемещение и скорость точки над удаляемой колонной в момент времени $t = t_r$:

$$\begin{aligned} u_1(t_r) &= (u_{st})_0 \left[1 - \frac{1-2\xi_e^2}{t_r \omega_D} e^{-\xi_e \omega_n t_r} \sin \omega_D t_r - \frac{2\xi_e}{t_r \omega_n} (1 - e^{-\xi_e \omega_n t_r} \cos \omega_D t_r) \right], \\ \dot{u}_1(t_r) &= \left. \frac{du_1(t)}{dt} \right|_{t=t_r} = \frac{(u_{st})_0}{t_r} \left[1 - e^{-\xi_e \omega_n t_r} \cos \omega_D t_r - \frac{\xi_e}{\sqrt{1-\xi_e^2}} \sin \omega_D t_r \right]. \end{aligned}$$

Подставив выражения (17) и (18) в формулу (16) после необходимых преобразований, получим

$$\begin{aligned} u_2(t) &= (u_{st})_0 \left\{ 1 + \frac{2\xi_e}{t_r \omega_n} [e^{-\xi_e \omega_n t_r} \cos \omega_D t - e^{-\xi_e \omega_n (t-t_r)} \cos \omega_D (t-t_r)] \right. \\ &\quad \left. - \frac{1-2\xi_e^2}{t_r \omega_D} [e^{-\xi_e \omega_n t_r} \sin \omega_D t - e^{-\xi_e \omega_n (t-t_r)} \sin \omega_D (t-t_r)] \right\}. \end{aligned}$$

В итоге решение для динамической реакции $u(t)$ конструктивной системы при сценарии удаления колонны в общем виде можно записать следующим образом:

$$u(t) = \begin{cases} u_1(t) & t \leq t_r, \\ u_2(t) & t > t_r, \end{cases}$$

где $u_1(t)$ и $u_2(t)$ заданы формулами (16) и (19), соответственно.

Выводы

В данной статье предложена эквивалентная модель подконструкции с одной степенью свободы для прогнозирования динамического отклика железобетонных рамных каркасов многоэтажных зданий при особых воздействиях по сценарию удаления одной из несущих колонн. Модель учитывает один из важнейших параметров статико-динамического деформирования железобетонной конструктивной системы при внезапном перераспределении силовых потоков - время удаления несущей колонны, а также изменение жесткостных и демпфирующих свойств конструкции при ее упругом, неупругом деформировании и трещинообразовании.

Выполнено приведением распределенной по конструкции массы в эквивалентную сосредоточенную массу используя гипотезу равенства максимальных кинетических энергий исходной и обобщенной моделей. При этом определены важнейшие входные параметры системы, такие как эквивалентная сосредоточенная масса, жесткость, эквивалентный коэффициент демпфирования и получена формула для определения перемещения точки над удаляемой колонной с течением времени.

Перспективы дальнейшей разработки темы видятся в решении теоретических задач статико-динамического деформирования конструктивно нелинейных рамных каркасов зданий и сооружений в предельных и запредельных состояниях со сложно напряженными элементами, в т.ч. предварительно напряженными элементами сплошного и составного сечения для конструкций из высокопрочного железобетона и фиброжелезобетона, а также в развитии существующих методов испытаний конструкций на особые и аварийные воздействия для обновления как научно исследовательской, так и практической методологии получения более полных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kiakoouri F., Sheidaii M.R., De Biagi V., Chiaia B. Progressive collapse of structures: A discussion on annotated nomenclature // Structures. 2021. №29. С. 1417–1423. DOI:10.1016/J.ISTRUC.2020.12.006.
2. Pearson C., Delatte N. Ronan Point Apartment Tower Collapse and its Effect on Building Codes // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2005. №2(19). С. 172–177. DOI:10.1061/(ASCE)0887-3828(2005)19:2(172).
3. GSA. Alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance. Washington D.C.: General Services Administration, 2016. 203 с.
4. UFC 4-023-03: Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, US Department of Defense, Washington, DC USA, 2009.
5. СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. М.: Минстрой России, 2018. 33 с.
6. Xuan Dat P., Tan K.H. Experimental study of beam-slab substructures subjected to a penultimate-internal column loss // Engineering Structures. 2013. №55. С. 2–15. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2013.03.026.
7. Qian K., Li B. Performance of Three-Dimensional Reinforced Concrete Beam-Column Substructures under Loss of a Corner Column Scenario // Journal of Structural Engineering. 2013. №4(139). С. 584–594. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000630.
8. Sadek F., Main J.A., Lew H.S., Bao Y. Testing and Analysis of Steel and Concrete Beam-Column Assemblies under a Column Removal Scenario // Journal of Structural Engineering. 2011. №9(137). С. 881–892. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000422.
9. Yi W.J., He Q.F., Xiao Y., Kunnath S.K. Experimental study on progressive collapse-resistant behavior of reinforced concrete frame structures // ACI Structural Journal. 2008. №4(105). С. 433–439. DOI:10.14359/19857.
10. Yu J., Tan K.H. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages // Engineering Structures. 2013. №55. С. 90–106. DOI:10.1016/j.engstruct.2011.08.040.
11. Pham A.T., Tan K.H. Static and Dynamic Responses of Reinforced Concrete Structures under Sudden Column Removal Scenario Subjected to Distributed Loading // Journal of Structural Engineering. 2018. №1(145). С. 04018235. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002214.
12. Kai Q., Li B. Dynamic performance of RC beam-column substructures under the scenario of the loss of a corner column—Experimental results // Engineering Structures. 2012. №42. С. 154–167. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2012.04.016.
13. Yu J., Rinder T., Stolz A., Tan K.-H., Riedel W. Dynamic Progressive Collapse of an RC Assemblage Induced by Contact Detonation // Journal of Structural Engineering. 2014. № 6(140). С. 04014014. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000959.

14. Weng Y.H., Qian K., Fu F., Fang Q. Numerical investigation on load redistribution capacity of flat slab substructures to resist progressive collapse // *Journal of Building Engineering*. 2020. №29. C. 101109. DOI:10.1016/J.JOBE.2019.101109.
15. Pham A.T., Tan K.H., Yu J. Numerical investigations on static and dynamic responses of reinforced concrete sub-assemblages under progressive collapse // *Engineering Structures*. 2017. №149. C. 2–20. DOI:10.1016/j.engstruct.2016.07.042.
16. Yu J., Luo L., Li Y. Numerical study of progressive collapse resistance of RC beam-slab substructures under perimeter column removal scenarios // *Engineering Structures*. 2018. №159. C. 14–27. DOI:10.1016/j.engstruct.2017.12.038.
17. Dusenberry D.O., Hamburger R.O. Practical Means for Energy-Based Analyses of Disproportionate Collapse Potential // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2006. №4(20). C. 336–348. DOI:10.1061/(ASCE)0887-3828(2006)20:4(336).
18. Vlassis A.G., Izzuddin B.A., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A., Vlassis A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss—Part I: Simplified assessment framework // *Engineering structures*. 2008. № 30(5). C. 1308–1318.
19. Liu M., Pirmoz A. Energy-based pulldown analysis for assessing the progressive collapse potential of steel frame buildings // *Engineering Structures*. 2016. №123. C. 372–378. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2016.05.020.
20. Tsai M.H. An analytical methodology for the dynamic amplification factor in progressive collapse evaluation of building structures // *Mechanics Research Communications*. 2010. №1(37). C. 61–66. DOI:10.1016/J.MECHRESCOM.2009.11.001.
21. Amiri S., Saffari H., Mashhadi J. Assessment of dynamic increase factor for progressive collapse analysis of RC structures // *Engineering Failure Analysis*. 2018. №84. C. 300–310. DOI:10.1016/J.ENGFAILANAL.2017.11.011.
22. Khuyen H.T., Iwasaki E. An approximate method of dynamic amplification factor for alternate load path in redundancy and progressive collapse linear static analysis for steel truss bridges // *Case Studies in Structural Engineering*. 2016. №6. C. 53–62. DOI:10.1016/J.CSSE.2016.06.001.
23. Xu G., Ellingwood B.R. Probabilistic Robustness Assessment of Pre-Northridge Steel Moment Resisting Frames // *Journal of Structural Engineering*. 2011. №9(137). C. 925–934. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000403.
24. Brunesi E., Parisi F. Progressive collapse fragility models of European reinforced concrete framed buildings based on pushdown analysis // *Engineering Structures*. 2017. №152. C. 579–596. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2017.09.043.
25. Weng J., Lee C.K., Tan K.H. Simplified Dynamic Assessment for Reinforced-Concrete Structures Subject to Column Removal Scenarios // *Journal of Structural Engineering*. 2020. №12(146). C. 04020278. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002833.
26. Yu J., Guo Y. Nonlinear SDOF model for dynamic response of structures under progressive collapse // *Journal of Engineering Mechanics*. 2016. № 142(3).
27. Yu J., Yin C., Guo Y. Nonlinear SDOF Model for Progressive Collapse Responses of Structures with Consideration of Viscous Damping // *Journal of Engineering Mechanics*. 2017. №9(143). C. 04017108. DOI:10.1061/(ASCE)JEM.1943-7889.0001339.
28. Kwasniewski L. Nonlinear dynamic simulations of progressive collapse for a multistory building // *Engineering Structures*. 2010. № 5(32). C. 1223–1235. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2009.12.048.
29. Song B.I., Sezen H. Experimental and analytical progressive collapse assessment of a steel frame building // *Engineering Structures*. 2013. №56. C. 664–672. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2013.05.050.
30. Liu M. A new dynamic increase factor for nonlinear static alternate path analysis of building frames against progressive collapse // *Engineering Structures*. 2013. (№48). C. 666–673. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2012.12.011.
31. ATC-40 (Applied Technology Council) Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Redwood City: CA, 1996.
32. Priestley M.J.N., Grant D.N. Viscous damping in seismic design and analysis // *Journal of earthquake engineering*. 2005. №2(9). C. 229–255. DOI:10.1142/S1363246905002365.
33. Blandon C.A., Priestley M.J.N. Equivalent viscous damping equations for direct displacement based design // *Journal of earthquake engineering*. 2005. №2(9). C. 257–278. DOI:10.1142/S1363246905002390.
34. Liu T., Zhang Q. AP/VP specific equivalent viscous damping model for base-isolated buildings characterized by SDOF systems // *Engineering Structures*. 2016. №111. C. 36–47. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2015.12.024.
35. Chopra A.K. Dynamics of structures. Pearson Education India, 2007. 994 c.

REFERENCES

1. Kiakojour, F., Sheidaii, M.R., De Biagi, V., Chiaia, B. Progressive collapse of structures: A discussion on annotated nomenclature. *Structures*. 2021. No. 29. Pp. 1417–1423. DOI:10.1016/J.ISTRUC.2020.12.006.
2. Pearson, C., Delatte, N. Ronan Point Apartment Tower Collapse and its Effect on Building Codes. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2005. Vol. 19. No. 2. Pp. 172–177. DOI:10.1061/(ASCE)0887-3828(2005)19:2(172).
3. GSA. Alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance. Washington D.C., General Services Administration, 2016. 203 p.
4. UFC 4-023-03: Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, US Department of Defense, Washington, DC USA, 2009. 244 p.
5. SP, 385.1325800.2018. Protection of buildings and structures from progressive collapse. Design rules. Basic provisions. M., Ministry of Construction of Russia, 2018. 33 p. (rus)
6. Xuan Dat, P., Tan, K.H. Experimental study of beam–slab substructures subjected to a penultimate-internal column loss. *Engineering Structures*. 2013. No. 55. Pp. 2–15. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2013.03.026.
7. Qian, K., Li, B. Performance of Three-Dimensional Reinforced Concrete Beam-Column Substructures under Loss of a Corner Column Scenario. *Journal of Structural Engineering*. 2013. Vol. 139. No. 4. Pp. 584–594. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000630.
8. Sadek, F., Main, J.A., Lew, H.S., Bao, Y. Testing and Analysis of Steel and Concrete Beam-Column Assemblies under a Column Removal Scenario. *Journal of Structural Engineering*. 2011. Vol. 137. No. 9. Pp. 881–892. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000422.
9. Yi, W.J., He, Q.F., Xiao, Y., Kunnath, S.K. Experimental study on progressive collapse-resistant behavior of reinforced concrete frame structures. *ACI Structural Journal*. 2008. Vol. 105. No. 4. Pp. 433–439. DOI:10.14359/19857.
10. Yu, J., Tan, K.H. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages. *Engineering Structures*. 2013. No. 55. Pp. 90–106. DOI:10.1016/j.engstruct.2011.08.040.
11. Pham, A.T., Tan, K.H. Static and Dynamic Responses of Reinforced Concrete Structures under Sudden Column Removal Scenario Subjected to Distributed Loading. *Journal of Structural Engineering*. 2018. Vol. 145. No. 1. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002214.
12. Kai, Q., Li, B. Dynamic performance of RC beam-column substructures under the scenario of the loss of a corner column—Experimental results. *Engineering Structures*. 2012. No. 42. Pp. 154–167. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2012.04.016.
13. Yu, J., Rinder, T., Stolz, A., Tan, K.-H., Riedel, W. Dynamic Progressive Collapse of an RC Assemblage Induced by Contact Detonation. *Journal of Structural Engineering*. 2014. Vol. 140. No. 6. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000959.
14. Weng, Y.H., Qian, K., Fu, F., Fang, Q. Numerical investigation on load redistribution capacity of flat slab substructures to resist progressive collapse. *Journal of Building Engineering*. 2020. No. 29. DOI:10.1016/J.JOBE.2019.101109.
15. Pham, A.T., Tan, K.H., Yu, J. Numerical investigations on static and dynamic responses of reinforced concrete sub-assemblages under progressive collapse. *Engineering Structures*. 2017. No. 149. Pp. 2–20. DOI:10.1016/j.engstruct.2016.07.042.
16. Yu, J., Luo, L., Li, Y. Numerical study of progressive collapse resistance of RC beam-slab substructures under perimeter column removal scenarios. *Engineering Structures*. 2018. No. 159. Pp. 14–27. DOI:10.1016/j.engstruct.2017.12.038.
17. Dusenberry, D.O., Hamburger, R.O. Practical means for energy-based analyses of disproportionate collapse potential. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2006. Vol. 20. No. 4. Pp. 336–348. DOI:10.1061/(ASCE)0887-3828(2006)20:4(336).
18. Vlassis, A.G., Izzuddin, B.A., Elghazouli, A.Y., Nethercot, D.A., Vlassis, A.G., Elghazouli, A.Y., Nethercot, D.A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss—Part I: Simplified assessment framework. *Engineering structures*. 2008. Vol. 30. No. 5. Pp. 1308–1318. DOI:10.1016/j.engstruct.2007.07.011
19. Liu, M., Pirmoz, A. Energy-based pulldown analysis for assessing the progressive collapse potential of steel frame buildings. *Engineering Structures*. 2016. No. 123. Pp. 372–378. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2016.05.020.
20. Tsai, M.H. An analytical methodology for the dynamic amplification factor in progressive collapse evaluation of building structures. *Mechanics Research Communications*. 2010. Vol. 37. No. 1. Pp. 61–66. DOI:10.1016/J.MECHRESCOM.2009.11.001.
21. Amiri, S., Saffari, H., Mashhadi, J. Assessment of dynamic increase factor for progressive collapse analysis of RC structures. *Engineering Failure Analysis*. 2018. No. 84. Pp. 300–310. DOI:10.1016/J.ENGFAILANAL.2017.11.011.
22. Khuyen, H.T., Iwasaki, E. An approximate method of dynamic amplification factor for alternate load path in redundancy and progressive collapse linear static analysis for steel truss bridges. *Case Studies in Structural Engineering*. 2016. No. 6. Pp. 53–62. DOI:10.1016/J.CSSE.2016.06.001.

23. Xu, G., Ellingwood, B.R. Probabilistic Robustness Assessment of Pre-Northridge Steel Moment Resisting Frames. *Journal of Structural Engineering*. 2011. Vol. 137. No. 9. Pp. 925–934. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000403.
24. Brunesi, E., Parisi, F. Progressive collapse fragility models of European reinforced concrete framed buildings based on pushdown analysis. *Engineering Structures*. 2017. No. 152. Pp. 579–596. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2017.09.043.
25. Weng, J., Lee, C.K., Tan, K.H. Simplified Dynamic Assessment for Reinforced-Concrete Structures Subject to Column Removal Scenarios. *Journal of Structural Engineering*. 2020. Vol. 146. No. 12. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002833.
26. Yu, J., Guo, Y. Nonlinear SDOF model for dynamic response of structures under progressive collapse. *Journal of Engineering Mechanics*. 2016. Vol. 142. No. 3. DOI:10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001031.
27. Yu, J., Yin, C., Guo, Y. Nonlinear SDOF Model for Progressive Collapse Responses of Structures with Consideration of Viscous Damping. *Journal of Engineering Mechanics*. 2017. Vol. 143. No. 9. DOI:10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001339.
28. Kwasniewski, L. Nonlinear dynamic simulations of progressive collapse for a multistory building. *Engineering Structures*. 2010. Vol. 32. No. 5. Pp. 1223–1235. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2009.12.048.
29. Song, B.I., Sezen, H. Experimental and analytical progressive collapse assessment of a steel frame building. *Engineering Structures*. 2013. No. 56. Pp. 664–672. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2013.05.050.
30. Liu, M. A new dynamic increase factor for nonlinear static alternate path analysis of building frames against progressive collapse. *Engineering Structures*. 2013. No. 48. Pp. 666–673. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2012.12.011.
31. ATC-40 (Applied Technology Council) Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Redwood City, CA, 1996.
32. Priestley, M.J.N., Grant, D.N. Viscous damping in seismic design and analysis. *Journal of earthquake engineering*. Vol. 9. No. 2. Pp. 229–255. DOI:10.1142/S1363246905002365.
33. Blandon, C.A., Priestley, M.J.N. Equivalent viscous damping equations for direct displacement based design. *Journal of earthquake engineering*. 2005. Vol. 9. No. 2. Pp. 257–278. DOI:10.1142/S1363246905002390.
34. Liu, T., Zhang, Q. AP/VP specific equivalent viscous damping model for base-isolated buildings characterized by SDOF systems. *Engineering Structures*. 2016. No. 111. Pp. 36–47. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2015.12.024.
35. Chopra, A.K. Dynamics of structures. Pearson Education India, 2007. 994 p.

Информация об авторах

Ву Нгок Туен

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры фундаментального образования,
E-mail: WuNgokTuen@gic.mgsu.ru

Федорова Наталья Витальевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
Советник РААСН, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой промышленного и гражданского строительства,
E-mail: fedorova@mgsu.ru

Information about authors

Vu Ngoc Tuyen

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Fundamental Education,
E-mail: WuNgokTuen@gic.mgsu.ru

Fedorova Natalia V.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Advisor of RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Industrial and Civil Engineering,
E-mail: fedorova@mgsu.ru

С.В. РАСТОРГУЕВ¹¹ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ИСТОРИИ АРХИТЕКТУРЫ НА ОСНОВЕ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. Цифровые технологии и искусственный интеллект становятся всё более актуальными в различных областях человеческой деятельности, в частности, в научных исследованиях. Если говорить об истории архитектуры, то технологии расширенной реальности (AR/VR) и 3D моделирования только начинают апробироваться в этом разделе науки. Ставка делается на 3D реконструкцию как отдельных исторических памятников, так и более крупных объектов. В статье описываются способы 3D реконструкции – ручное моделирование, различные варианты 3D сканирования, в том числе фотограмметрический метод. Оцениваются возможности привлечения искусственного интеллекта для развития технологии. Рассматриваются способы воссоздания в цифровой среде сложных архитектурных комплексов вплоть до городов применительно к разным историческим эпохам. Как отдельная ветка исследования приводится вариант реконструкции нереализованных архитектурных проектов известных авторов. В качестве рабочих примеров приводятся цифровые 3D модели Москвы нач. XIX и XX веков, Санкт-Петербурга нач. XVIII века, Ярославля нач. XX века и альтернативной модели Москвы с реализованными объектами Русского авангарда нач. XX века и генплана 1935 г. Оцениваются перспективы дальнейшего развития описываемой технологии.

Ключевые слова: памятник архитектуры, 3D моделирование, расширенная реальность, фотограмметрия, 3D город, авангард, альтернативная история.

S.V. RASTORGUEV¹¹Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

METHODS OF STUDYING THE HISTORY OF ARCHITECTURE BASED ON 3D MODELING

Abstract. Digital technologies and artificial intelligence are becoming increasingly relevant in various areas of human activity, in particular, in scientific research. If we talk about the history of architecture, then the technologies of extended reality (AR/VR) and 3D modeling are just beginning to be tested in this section of science. The focus is on 3D reconstruction of both individual historical monuments and larger objects. The article considers 3D reconstruction methods – manual modeling and various 3D scanning options, including the photogrammetric method. Artificial intelligence can also be used in different ways to advance technology. The article examines methods for recreating complex architectural objects, including cities, in a digital environment, in relation to different historical eras. As a separate area of research, a variant of reconstruction of unrealized architectural projects of famous authors is given. As working examples, digital 3D models of Moscow of the early 19th and 20th centuries, St. Petersburg of the early 18th century, Yaroslavl of the early 20th century and an alternative model of Moscow with implemented objects of the Russian avant-garde of the early 20th century and the general plan of 1935 are given. The prospects for further development of the described technology are assessed.

Keywords: architectural monument, 3D modeling, extended reality, photogrammetry, 3D city, avant-garde, alternative history.

Введение

Самые современные технологии парадоксальным образом могут быть направлены на то, чтобы ощутить присутствие в исторических эпохах с помощью изучения реконструированных в 3D моделях исторических памятников в дополненной и виртуальной реальности или просто на экране гаджета. Дополненная реальность позволяет рассматривать 3D модель, как макет, расположенный в реальном окружении. Применительно к архитектуре такой способ визуализации больше подходит для моделей отдельных зданий. Также можно дополнять модель различными информационными выносками, метками, разрезами в разных плоскостях и прочими дополнениями, повышающими информативность визуализации [1].

Виртуальная реальность позволяет полностью погрузиться в среду объекта, наблюдать его панорамно, на все 360°. Для просмотра требуются очки виртуальной реальности. Таким способом удобнее изучать архитектурные пространства - от отдельных интерьеров до городских улиц или городов в целом. Также возможны разнообразные информационные дополнения или подсказки при просмотре объекта [2].

Технологии трёхмерного воссоздания архитектурных объектов логично использовать для производства точных цифровых копий зданий. Однако, интереснее с научной точки зрения применять их и другими способами.

В такой цифровой реконструкции или воссоздании в большей мере нуждаются утраченные или потерявшие свой первоначальный облик известные исторические здания [3], кварталы, улицы и в конечном итоге – города. Под этим углом зрения 3D моделирование становится инструментом, позволяющим исследовать и сохранять мировое культурное наследие [4]. Кроме того, можно представить и другие его функции, связанные с изучением истории архитектуры, например – воссоздание не реализованных архитектурных проектов, которые уже в «бумажном» виде стали широко известны и тем или иным образом повлияли на развитие мировой архитектуры. Для начала необходимо рассмотреть, как методы моделирования, так и объекты, применительно к которым такой способ воссоздания уместен [5].

Создание цифровых копий отдельных зданий - явление довольно популярное в настоящее время [6, 7]. Наверное, самый известный пример, когда такая копия пригодилась — цифровая модель собора Парижской Богоматери, сделанная американским профессором Э. Тэллоном за несколько лет до печально известного пожара методом 3D сканирования [8]. Позже специалисты использовали детализированные 3D-модели собора для планирования восстановительных работ.

Однако, в цифровой среде масштаб создаваемых объектов не так важен и кроме отдельных зданий возможно так или иначе оцифровывать целые города.

Технология оцифровки современных городов в большом числе случаев применяется в картографических сервисах Google и Apple. Также можно найти немногочисленные примеры воссоздания исторического облика городов, связанных по большей части с археологическими изысканиями или компьютерными играми [9].

Одним из самых известных таких примеров является цифровой римский город Помпеи, оригинал которого был погребён при извержении Везувия в 79 году н.э. [10]. Реконструкция была сделана на основе сохранившихся руин. Также стоит отметить виртуализацию Персеполя, столицы древней Персидской империи. В качестве примеров воссоздания древних городов для видеоигр можно привести Александрию, Мемфис и Рим в серии «Assassin's Creed» [11].

Следует отметить, что часть приведённых примеров характеризуются слишком узкопрофессиональной релевантностью, работа по их созданию была чрезвычайно трудоёмкой [12]. Реконструкции для компьютерных игр наоборот носят более декоративный,

даже «сувенирный» характер и точность передачи городской среды в этих проектах стоит не на первом месте. Единой методики 3D реконструкции перечисленные примеры не выдвигают.

В данной статье рассматривается как технологии 3D реконструкции городов, так и реальные примеры, созданные в XR-лаборатории ИАиД ЯГТУ под руководством автора этого текста.

Об актуальности описываемых проектов говорит то, что материалы исследований были презентованы на выставке «Зарядье. Архивы возможного» (Москва, парк Зарядье, 2023 г.) [13], они дважды экспонировались на Ярославском градостроительном форуме в 2018 и 2022 гг. [14], им была посвящено 2 отдельных передачи на телеканале День.тв [15], доклад о разработке был представлен также на архитектурной секции форума SmartBuild «Стройка Политеха» 2023.

Метод и модели

Методы 3D моделирования различаются своей технологичностью, затратностью и скоростью создания объектов, что определяет их области применения.

Самым традиционным и экономичным в плане привлечения сложных технологий методом является *ручное создание 3D моделей* на основе архивных чертежей, фотографий, карт, рисунков и исторических описаний. Этот подход, с одной стороны, требует высокой точности и внимания к деталям и высокой квалификации разработчика, больших затрат времени на создание одного объекта. С другой стороны – он наименее требователен к исходным данным, которых часто недостаточно при историческом воссоздании объекта. При правильно сформулированных изначальных требованиях к сложности модели, например – количеству полигонов, полученные таким способом 3D объекты не будут требовать дальнейшей оптимизации.

Различные *способы объёмного сканирования* – лазерное, как в технологии LIDAR или близкий к ней метод «структурированного света» позволяют получать точные трехмерные данные об объекте. Однако в рассматриваемом контексте подобные технологии могут быть применены к реконструкции частично утраченных или видоизменённых зданий. Полученная при сканировании информация обрабатывается и используется для автоматизированного создания подробных 3D моделей [16]. Метод довольно популярен для создания точной копии реального объекта в цифровой форме. Созданные таким способом 3D объекты нуждаются в дальнейшей оптимизации, а их доработка-достройка происходит уже ручными или иными способами [17].

Фотограмметрический метод включает использование фотографий для создания точных 3D моделей [18]. Этот процесс требует серии снимков, сделанных с разных точек и под разными углами, которые затем анализируются специализированным ПО для построения трехмерной модели. Касаясь поставленной задачи, можно выделить и несколько недостатков данного метода: отсутствие большого количества фотографий утраченного исторического памятника с разных ракурсов [19]. Также нужно отметить чрезмерную сложность получаемых 3D моделей, необходимость не только в их оптимизации, но и устранения «шума» – различных артефактов, возникающих при неточном распознавании исходных снимков. Их число растёт прямо пропорционально уменьшению количества ракурсов съёмки и снижению качества фото [20].

Любой из представленных способов моделирования исторических архитектурных объектов в перспективе может быть дополнен с помощью Искусственного интеллекта (ИИ).

В последнее время всё больше проектов и программных продуктов начинают интегрировать ИИ для автоматизации и улучшения процесса 3D моделирования [21]. Тем не менее, на данный момент ещё нет готовых решений, которые способны напрямую быть привлечены в процессы создания виртуальной градостроительной модели.

Среди примеров использования ИИ в 3D моделировании стоит отметить:

Autodesk Maya, которая использует искусственный интеллект с помощью модуля Bifrost для автоматизации процессов создания реалистичной визуализации [22].

Adobe Substance Alchemist использует ИИ для улучшения создания текстур и материалов в 3D моделировании: преобразовывает фотографии в hi-res текстуры, автоматически удаляет шумы и нежелательные элементы, а также подбирает и предлагает материалы [23].

ZBrush использует концепцию ИИ под названием ZRemesher для упрощения топологии сложных 3D моделей и автоматического создания эффективных полигональных сеток, что существенно ускоряет процесс оптимизации 3D объектов [24].

ИИ способен анализировать большие объёмы исторических данных и предлагать наиболее вероятные варианты восстановления утраченных элементов. Машинное обучение помогает сократить время, необходимое на создание моделей, и может повышать их точность путём «домысливания» на основе известных примеров. Однако, эта способность ИИ требует модерации получаемых объектов на предмет их аутентичности и схожести с реальными историческими аналогами. Тем не менее ценность и перспектива применения ИИ несомненны, поскольку эта технология поможет значительно экономить время, например, при создании фоновой городской среды, элементов антуража. Специализация ИИ в том, что он способен быстро создавать множество вариантов решений. И уже задача разработчика-модератора выбрать наиболее уместное. Возможно, впоследствии станет доступна опция восстановления целого здания из его сохранившейся части.

Если говорить о технологии моделирования таких крупных и сложных объектов, как 3D города [25], то можно для начала разделить этот процесс на 2 крупные составные части, границы которых продиктованы как наличием исторических данных о разных частях и объектах городов, так и необходимостью постоянной оптимизации как самой модели, так и процесса её создания.

Таковыми частями будут:

1. Моделирование знаковых объектов, для которых реалистично найти большое количество исходных данных, позволяющих воссоздать их достаточно точно.
2. Создание «Фоновой» застройки, о которой сохраняется в разы меньше сведений и способы её реконструкции значительно менее тривиальны.

Воссоздание отдельных известных, но утраченных «городских достопримечательностей» – процесс вполне понятный среднему 3D специалисту. Он состоит в правильном масштабировании архивных планов и фасадов, а при наличии и деталей требуемого здания, расстановки их в соответствующих плоскостях в трёхмерной среде и моделировании с опорой на реальные размеры всех элементов в чертежах.

Понятно, что чем больше моделей разрабатывает 1 автор, тем дольше этот процесс и больше вероятность, что автор будет меньше погружаться в детали каждого объекта и будет склонен использовать единые детали и заготовки. Поэтому имеет смысл расширять число авторов-разработчиков уникальных объектов ещё и потому, что в реальности строители и архитекторы у них были тоже разные.

В учебной среде такой краудсорсинговый подход вполне возможен, например, каждый студент, изучая историю архитектуры, самостоятельно собирает материалы и создаёт 3D модель одного из утраченных архитектурных объектов, представляющих интерес. Это помогает эффективнее изучить историю архитектуры, у многих архитекторов лучше развита визуальная память. Ко всем создаваемым объектам должны предъявляться изначально унифицированные требования: ограничение по размеру модели (в Мб файла) из которого следует ограничение в количестве полигонов модели. Иными словами, 3D модель города не может состоять из тысяч зданий, где подробно смоделирована каждая дверная ручка. Современные мощности не позволяют оперировать такими моделями. Нужна разумная

оптимизация – баланс между внешним видом модели и её «весом» в Мб [26]. Также требования предъявляются к материалам/текстурам: минимальное их количество – это по одному материалу для стен, окон и крыш. Допускается больше, но в разумных пределах. Отметим, что подобный подход применялся при создании нескольких из описанных ниже примеров и показал свою неплохую результативность.

Коснёмся теперь понятия «фон города», которое мы так или иначе употребляли ранее. По опыту создания нескольких проектов выяснилось, что наиболее доступными из исторических материалов оказываются планы городов на определённый период. Количество материалов, показывающих внешний вид зданий стремительно сокращается при отдалении от нас исследуемой эпохи. Конец XIX века предоставляет в распоряжение разработчика множество фотографий, но смещаясь за середину века, двигаясь к первой его половине названный разработчик теряет этот «диапазон зрения» и ему приходится опираться лишь на отдельные зарисовки, картины городских видов или же на «эхо» зданий, а именно на их фотофиксацию в более поздний период, относительно наблюдаемого. Но городской план при этом не теряет детальности, более того, он становится зачастую более подробным при ретроспективном перемещении. Подробнее в середине XVIII века, чем в середине XIX, очевидно ощущая на себе тяжесть ответственной функции единственного источника информации о городе того времени.

Итак, уникально информационно-насыщенный план города должен быть преобразован в 3D город, возможно и не настолько точный, как тот, который мы видим в нескольких метрах от себя, но создающий убедительный фон. На планах города в XVIII-XIX вв. чаще всего делили городскую застройку на деревянную и каменную, а также обозначали церкви и различные уникальные объекты. Зачастую можно примерно определить этажность. Таким образом, обратив внимание и на структуру улиц мы получаем этажность, функцию и иерархию зданий – что было городским ориентиром, а что неприятно скрывалось во дворах. Этой информации почти достаточно для построения модели, но всё же нужны фасады. Точных фасадов нет, однако выпускались неоднократно каталоги фасадов, например, «Собрание фасадов, Его Императорским Величеством Высочайше опробованных для частных строений» [27]. Кроме того, можно ориентироваться и на различные рисунки городов, чтобы понять их внешний вид, как минимум, силуэт в общих чертах. Что-то сохранилось до периода возникновения фотографии в 1840-1860-х г. При всём этом информации недостаточно для детального взгляда, но созданные на основе плана объёмы и фасады, приспособленные к получившимся объёмам на основе каталогов и дополнительных сведений дают городской фон, обладающий более чем 50% схожести с неведомым оригиналом.

Псевдосреда или псевдогород, создание такого фона, было бы куда более перспективно с привлечением ИИ, но как выяснилось, более-менее применимых решений под такой редкий запрос ещё не создано.

Необходимо выделить ещё несколько методов, применяемых в воссоздании исторических городов.

Ретроспективная методика базируется на современной 3D модели реконструируемого города. Для многих городов доступны модели, основанные на данных GIS – фактически, это поднятые на нужное число этажей абрисы планов домов без каких-либо деталей и в том числе форм крыш [28]. Реконструкция заключается в удалении из модели зданий, построенных позже требуемого периода. Эффективность такого метода варьируется в зависимости от города: например, при реконструкции на период нач. XX в. Москвы оказываются полезными в работе лишь около 20% существующих сейчас зданий, тогда как для Ярославля и особенно его центральной части этот процент повышается до 70-80. В любом случае исторические изменения меньше затрагивают структуру улиц и кварталов, чем отдельные здания, потому градостроительная планировочная структура чаще может быть употребима.

Релятивистский подход, в котором имеет смысл выделить 3 принципа применения:

1. Зависимость детальности проработки модели от траектории движения камеры в планируемой её презентации — от взгляда наблюдателя. Всё что находится близко от траектории проработано подробнее, чем более удалённые территории. Это позволяет экономить как время не только на разработку, но и на визуализацию (рендер) каждого кадра видео.
2. От объекта, который требуется рассмотреть. Это может быть как отдельное здание, так и целый район города. Соответственно, в этом случае, детально прорабатывается нужный объект или территория, а на всё остальное действуют «правила фона». На базе такой 3D разработки может быть создан мультимедийный материал, рассматривающий детали здания, карнизы, колонны, проёмы, предметы интерьера либо примыкающего к объекту благоустройства и т.п. В другом же случае разрабатывается подробный гид определённого района города на период 100-200 или более лет назад.
3. От автора/исполнителя. В данном случае действует краудсорсинговый подход, описанный выше: работы разных авторов состыковываются на единой 3D карте города. В таком случае нужны не только единые правила 3D моделирования для всех, но и единый визуальный подход, внутренний дизайн-код. В любом случае требуется единый модератор 3D города, который имеет возможность корректировать внешний вид всех объектов, чтобы создать выдержанный визуальный облик всего разрабатываемого города.

В целом такой подход позволяет получать результаты уже в процессе разработки, который может быть очень длительным, в том числе из-за множественных доработок исходя из вновь открываемых деталей или архивных материалов, поток которых применительно к городу, состоящему из тысяч зданий бывает очень велик. Таким образом достигается одновременная нацеленность и на исследовательский процесс, и на результат. Каждая локальная разработка на единой карте города улучшает глобальную модель города и даёт необходимые локальные результаты, способствующие популяризации общей разработки.

Ещё один не метод, а скорее *эффект обратной связи*. Сложность созданного объекта – трёхмерного города настолько высока, что при её изучении возникают новые ракурсы, с которых город открывается по-новому неожиданно. В этом он схож и с настоящим городом. С другой стороны, данный эффект придаёт городской 3D модели в разработке свойства цифровой строительной площадки, которая сама формулирует задание для разработчика. С новых ракурсов и неожиданных точек зрения становится видно, какие доработки требуются модели даже в тех зонах, которые, казалось бы, в целом выглядят построенными. Этот артефакт визуализации может быть связан с некачественной стыковкой фоновых объектов с объектами переднего плана, странностью и неравновесностью композиций отдельных участков города, недостатками антуража или с явной непохожестью городского ландшафта при сравнении его с архивными материалами. Нужно отметить, что процесс таких доработок с помощью случайных видовых точек может быть практически бесконечным, поэтому разработчику нужно определить иерархию ценности различных ракурсов и понять на доработке каких территорий города следует остановиться в данный момент.

Результаты исследования и их анализ

Перейдём к рассмотрению исторических моделей городов, опыт создания которых обобщён в данной статье.

В настоящее время доступны две 3D модели исторической Москвы: более разработанная допожарная Москва начала XIX века и находящаяся в процессе создания дореволюционная Москва начала XX века.

Что касается 3D модели *Москвы начала XIX века*, создавалась она на основе следующих исторических данных: нескольких точных планов города [29], более подробных данных о

более чем 25 не дошедших до нашего времени знаковых архитектурных объектах - городских достопримечательностях, благодаря которым они были смоделированы наиболее подробно (см. рисунок 1).



Рисунок 1 – Визуализация 3D модели Москвы нач. XIX в.

Ретроспективным способом был перенесён из «будущего» и модифицирован под соответствующую эпоху Кремль. Также был задействован каталог типовых фасадов для каменной застройки и накопленные примеры деревянной застройки. Множество московских храмов, обозначенных на плане, были воссозданы в трёхмерной среде с помощью аналогов, по наиболее знаковым были найдены уточняющие данные, например, фотографии более позднего времени. В дополнение были использованы найденные рисунки и гравюры городской среды близких исторических периодов [30].

Приводим перечень утраченных в настоящее время объектов, которые были воссозданы наиболее точно в модели (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Перечень значимых объектов в 3D модели Москвы начала XIX века.

	<i>Название объекта</i>	<i>Годы существования</i>
1	Москворецкие ворота	1535—1813
2	Свайный Москворецкий мост	1789—1833
3	Алевизов ров	1508—1814
4	Церковь Константина и Елены в Кремле	1692—1928
5	Храм Святой Екатерины в Вознесенском монастыре	1808—1918
6	Малый Николаевский дворец (Архиерейский дом) в Кремле	1775—1929
7	Церковь Николы Гостунского в Кремле	1506—1817
8	Чудов монастырь	1365—1918
9	Зимний дворец Растрелли, реконструкция Н.А. Львова в Кремле	1798—1838
10	Собор Спаса Преображения на Бору	1330—1918
11	Церковь Благовещения на Житном дворе	1731—1932
12	Церковь Рождества Иоанна Предтечи на Бору	1505—1847
13	Всехсвятский каменный мост	1792—1850
14	Земский приказ	1699—1874
15	Торговые ряды Дж. Кваренги на Красной площади	1780—1812
16	Варварские ворота	1534—1934
17	Китайгородская стена	1535—1934

Продолжение Таблицы 1

	<i>Название объекта</i>	<i>Годы существования</i>
18	Угловая башня Китайгородской стены	1535—1934
19	Застройка Зарядья	1365—1947
20	Застройка Васильевского спуска	до 1936
21	Петровский театр (Театр Медокса)	1780—1805
22	Сухарева башня	1695—1934
23	Собор Вознесения Господня в Кремле	1587—1929
24	Старое здание Оружейной палаты	1806—1959
25	Воспитательный дом (частично перестроен)	С 1764

Особенностью данной исторической модели является то, что в ней фактически не удалось задействовать модель современной Москвы и ретроспективно её преобразовать. Этот метод оказался в данном случае нецелесообразен, поскольку городская застройка за 200 лет изменилась примерно на 90-95%. Единственное, что удалось задействовать — это рельеф, но даже он претерпел изменения в диапазоне 15-20%.

Москва начала XX века. Эта городская модель базируется в первую очередь на огромном количестве исторических фотографий конца XIX - начала XX века (см. рисунок 2).



*Рисунок 2 – Визуализация 3D модели Москвы нач. XX в.
На переднем плане памятник императору Александру II в Кремле*

Существуют специальные онлайн-сервисы, где большинство из доступных фотографий собрано и благодаря геопривязке они расставлены на карте города и даже имеют указатели направления камеры фотографа [31]. ИИ также оказался задействован в проекте из-за того, что многие фотографии имеют колонизованные версии, созданные с помощью нейросетей. Сами планы Москвы выпускались в нач. XX века в по несколько раз в год, что также помогло в подробной разработке проекта. Кроме того, в данном случае удалось ретроспективно модифицировать современную модель Москвы, задействовав примерно 40-50% её зданий в центральной части города, ограниченной Садовым кольцом. Дальше (ближе к окраинам), этот процент стремительно снижается до 10-15. Однако, такой большой объём исходных данных

значительно повысил планируемую детализацию 3D модели, увеличив количество значимых объектов и отодвинув территории «городского фона», что привело к замедлению процесса её создания. Тестовые траектории в окрестностях Кремля уже доступны для просмотра [32], но остальная часть города всё ещё находится в длительной разработке.

Модель Санкт-Петербурга начала XVIII века была создана на наиболее скупой исторической базе из всех перечисленных в статье разработок (см. рисунок 3).



Рисунок 3 – Визуализация 3D модели Санкт-Петербурга начала XVIII века

Картографические материалы по городу начиная с 1725 г. отличаются очень высоким качеством, некоторые из них можно назвать произведениями графического искусства, тем не менее материалов на период самых первых городских построек значительно меньше. Современная модель Санкт-Петербурга в этом проекте оказалась полностью нерелевантной, изменилось всё, даже рельеф. Опираясь на редкие и разрозненные графические материалы и аналитику, граничащую с фантазией разработчиков, удалось по мере возможности воссоздать более-менее целостный вид города в ту легендарную эпоху начала его строительства.

Дореволюционный Ярославль на период примерно 1911 года напротив располагает довольно обширной базой исходных данных. Принцип создания этой модели был близок к реконструкции Москвы нач. XX века, однако эта модель делалась более детально, чему способствовала меньшая площадь территории города (см. рисунок 4).



Рисунок 4 – Визуализация 3D модели Ярославля 1911 г.

Кроме того, резонанс, вызванный появлением описываемой модели, привёл парадоксальным образом к тому, что к разработчикам стало поступать большое количество разнообразных правок и дополнений. Таким образом, хотя модель города и выглядит законченной, но её совершенствование займёт ещё значительное время. Тем не менее, 3D модель наряду с прочими зданиями содержит 25 городских достопримечательностей [33], полностью или частично исчезнувших, которые приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Перечень значимых объектов в 3D модели Ярославля начала XX века.

	<i>Название объекта</i>	<i>Годы существования</i>
1	Церковь Петра и Павла и церковь Николая Чудотворца	1691—1937
2	Церковь Троицы Живоначальной Пятницкого прихода	1730—1937
3	Крестовоздвиженская церковь (частично разрушена в 1929 г.)	С 1688
4	Церковь Сошествия Святого Духа	1688—1938
5	Церковь Введения Пресвятой Богородицы во Храм	1738—1933
6	Ресторан Бутлера	1902—1930
7	Церковь Варвары и Екатерины Великомученицы	1668—1931
8	Церковь Жен Мироносиц Всехсвятского прихода	1683—1937
9	Церковь Рождества Иоанна Предтечи	1670—1932
10	Мытный рынок	1820—1981
11	Святые ворота с колокольной Казанского монастыря	1821—1923
12	Гостиница Кокуева	1864—1980
13	Гостиный двор, южный корпус	1813—1920
14	Церковь Рождества Богородицы	1720—1930
15	Спасо-преображенский монастырь (частично перестроен в 1923 г.)	С 1516
16	Американский мост	1873—1960
17	Церковь Иоанна Богослова	1679—1934
18	Успенский кафедральный собор	1670—1937
19	Демидовский юридический лицей	1826—1929
20	Церковь Иоанна Златоуста в Рубленном городе	1690—1931
21	Николаевский мост (частично перестроен в 2005 г.)	С 1910
22	Колокольня комплекса Благовещенских храмов	1688—1929
23	Церкви Власьевского прихода	1679—1933
24	Церковь Козьмы-Дамиана	1871—1930
25	Церковь Воскресения Христова	1769—1930

Проект «Москва, которой не было». Модель «возможной реальности» или альтернативной ветки реальности (см. рисунок 5).

Этот проект — с теоретической точки зрения: ретрофутуристическая проекция, начинающиеся в определённом историческом периоде, а именно примерно в 1920-е, когда стартовало движение архитектурного авангарда. Как будто бы тогда изменились обстоятельства и все не реализованные в нашей «ветке реальности» проекты авангардистов здесь были построены. Такие исследования привлекательны тем, что обманывают наше чувство восприятия времени, которое не входит в состав классических 9 чувств. На практике, точнее в цифровой среде, за основу была взята 3D модель современной Москвы, установлены, на сколько это возможно было определить, планируемые места расположения значимых проектов авангардистов, а сами объекты были смоделированы разными авторами краудсорсинговым методом и размещены на соответствующих точках. На самом деле проект

не остановился лишь на 20-х годах, а развивался далее во времени, охватив и 30-е, включив в себя части генплана Москвы 1935 г., и немногочисленные более поздние не реализованные постройки вплоть до 1970-х. [34] Особенности работы над отдельными объектами заключались в том, что часто в доступе оказывались только виды с одной стороны на здание и в совокупности с планом приходилось творчески додумывать остальную часть объёма. Сам проект до сих пор находится в развитии и насчитывает на текущий момент более 70 построек (см. таблицу 3).



Рисунок 5 – Визуализация 3D модели «Москвы, которой не было».

На переднем плане здание Народного Комиссариата Тяжелой Промышленности СССР, арх. И. Леонидова.

Таблица 3. - Перечень реконструированных в 3D моделях не реализованных архитектурных проектов в Москве

	<i>Название объекта</i>	<i>Автор проекта</i>	<i>Годы проектирования</i>
1	Коммунальный дом	Н. Ладовский	1919
2	Храм общения народа	Н. Ладовский	1919
3	Ленинская трибуна	Эль Лисицкий	1920
4	Архитектон Альфа	К. Малевич	1920
5	Архитектон-Небоскрёб	К. Малевич	1920
6	Дорогомиловский рынок	М. Коржев	1922
7	Архитектон Гота	К. Малевич	1923
8	Дворец Труда	Братья Веснины	1923
9	Небоскрёб ВСНХ	В. Кринский	1923
10	Горизонтальный небоскрёб	Эль Лисицкий	1925
11	Редакция газеты Ленинградская Правда	Братья Веснины	1924
12	АО Аркос	В. Кринский	1924
13	АО Аркос	Братья Веснины	1924
14	Центральный телеграф	Братья Веснины	1925
15	Типография газеты Известия	И. Леонидов	1926
16	Международный Красный стадион	М. Коржев	1926
17	Центральный оптово-розничный рынок	М. Барщ, М. Синявский	1926
18	Электробанк	И. Голосов	1926
19	Типография «Новый мир»	А. Куровский	1926
20	Институт Библиотекосведения им. Ленина	И. Леонидов	1927

Продолжение Таблицы 3

	<i>Название объекта</i>	<i>Автор проекта</i>	<i>Годы проектирования</i>
21	Башня в городе будущего	Л. Руднев	1927
22	Дом съездов	Р. Смоленская	1927
23	Летающий город	Г. Крутиков	1928
24	Композиция с вогнутыми поверхностям	Я. Черников	1928
25	Центральная библиотека им. Ленина	Братья Веснины	1929
26	Памятник Христофору Колумбу	Н. Ладовский	1929
27	Эллинг для дирижаблей	Б. и З. Розенфельды	1931
28	Архитектурная выдумка-иллюзия № 17	Я. Черников	1933
29-30	Композиция №18 и №24	Я. Черников	1933
31	Дворец Народов СССР	К. Мельников	1932
32	Дворец техники	А. Самойлов, Б. Ефимович	1933
33-45	Дворец Советов (конкурсные проекты разных авторов)	Б. Иофан, В. Гельфрейх, В. Щуко; Ле Корбюзье; Братья Веснины; В. Щуко, В. Гельфрейх; Х. Пельциг; И. Жолтовский; Н. Ладовский; Г. Гамильтон; Б. Иофан; В. Гропиус; В. Щуко; Х. Мейер	1931-1933
46-53	Здания Народного Комиссариата Тяжелой Промышленности СССР (конкурсные проекты разных авторов)	Братья Веснины; И. Леонидов; А. Мордвинов; А. Щусев, Д. Фридман; К. Мельников; бр. Веснины, С. Лященко; В. Щуко	1934-1935
54	Центральный дом Аэрофлота	Д. Чечулин	1934
55	Наркомат обороны	Л. Руднев	1934
56	Академия наук СССР	А. Щусев	1934
57	Дом Радио на Миусской площади	А. Душкин, А. Мордвинов	1934
58	Театр Мейерхольда	А. Щусев	1934
59	Проспект Дворца Советов	Институт Генплана Москвы	1935
60	Проспект Конституции	Институт Генплана Москвы	1935
61	Башня на въезде на проспект Конституции	С. Чернышев, А. Заславский, С. Кожин, А. Сурис	1935
62	Дом МежРабПомФильм	Институт Генплана Москвы	1935
63	Здание ТАСС	И. Голосов	1936
64	Большой Академический Кинотеатр	А. Великанов, И. Ткаченко и В. Щуко	1936
65	ВИЭМ им. А.М. Горького	Н. Лансере, В. Гридин, Э. Кольби	1936
66	Полиграфический комбинат «Известия»	Б. Иофан, А. Хряков	1940
67	Монумент героическим защитникам Москвы	Л. Павлов	1942
68	Административное здание в Зарядье	Д. Чечулин	1948
69	Проект перепланировки центра Москвы (частично)	Л. Павлов	1966-1967
70	Издательский комплекс «Известия»	Л. Павлов	1967
71	Центральный музей им. Ленина	Л. Павлов	1970
72	Здание Министерства внешней торговли	М. Посохин	1970

Переходя к обсуждению, можно отметить, что, хотя такое число объектов в масштабе Москвы выглядит совсем незначительным, но многие из них были довольно грандиозными и потому значительно изменили городской ландшафт. По большому счёту возник новый город в виртуальной реальности, проект «Москва, которой не было» вызвал большой резонанс.

Удивительным оказалось то, что подобные идеи воссоздания не построенных зданий генплана Москвы 1935 г. были реализованы в фильме «Мастер и Маргарита» 2024 г., который вышел на экраны на год позже упоминаемого проекта [35]. Неизвестно, есть ли прямая связь между этими событиями, но так или иначе происходит вовлечение новых групп в архитектурную дискуссию за счёт визуального отображения сложных по восприятию исторических фактов. Визуализация делает научные поиски и рассуждения наглядными и понятными.

Дискуссии, касающиеся упомянутых проектов, носили как научный характер, в том числе на ежегодном форуме ЯГТУ «Стройка Политеха», так и проходили в телевизионных студиях, но место провидения их значимость не уменьшает.

Одна из веток обсуждения – количественная составляющая фактических доказательств определённого исторического периода. Иными словами, как много необходимо исходных исторических документов или вещественных артефактов определённого исторического периода, чтобы его моделировать (создавать словесные описания, зарисовки, картины, 3D графику и пр.). Простая логика говорит, что соотношение должно быть, как минимум - 51% фактов и 49% допущений, тогда как в процессе дискуссий с историками на тему визуализаций истории городов выяснилось, что на практике достаточно иметь около 15-25% фактов, чтобы заполнить остальное поле допущениями.

Ещё одна дискуссия, вызванная описанной разработкой, а именно проектом «Москва, которой не было» прошла на тему не реализованных проектов авангардистов и их восприятия современными архитекторами в представленной модели. Не смотря на встречающуюся гигантоманию, не соблюдение масштаба города многие проекты тем не менее не вызывают отторжения. Выявленное положительное их свойство – полное исключение вторичности. Создавались эти проекты в эпоху отсутствия ограничений, когда многие, в том числе и архитекторы искали новый способ жизни человека. Потому большинство проектов авангардистов несут на себе отпечаток чистого эксперимента, безусловного поиска, как будто бы теории из мира идей кристаллизовались максимально точно и не подверглись трению чужих суждений, не изменили под их влиянием своей изначальной формы.

Также была обсуждена альтернативная реализация проекта воссоздания нереализованной Москвы в известном художественном фильме. Одним из обсуждавшихся аспектов был масштаб Дворца Советов. Оригинальный проект здания предполагал его высоту в 415 м, тогда как в фильме он достигал приблизительно 2 км, если сравнивать с расположенным на той же оси проспектом Дворца Советов, длина которого по генплану 1935 г. составляла около 4 км. Если бы это было так, то по приблизительным расчётам, с учётом того, что около 70% объёма здания занимали различные зрительные залы, остальные «офисные» помещения потребовали бы около 5 млн. человек персонала, что равнялось всему населению Москвы на момент написания М.А. Булгаковым романа «Мастер и Маргарита».

Выводы

3D моделирование исторических зданий и целых городов открывает не только большое поле для дальнейших исследований археологов, историков, архитекторов и общественности. Также имеет смысл заявить этот метод как новый в первую очередь археологический, но и в большой степени архитектурный инструмент исследования истории архитектуры. Данный инструмент делает аналитическую работу историка архитектуры максимально визуально-наглядной. Соответственно, скорректировать выводы и предостеречь от чересчур масштабных заблуждений сможет наиболее широкая аудитория наблюдателей. С одной стороны – это может замедлить процесс исторического исследования и выяснения определённых фактов, но

с другой - сам процесс изучения новых фактов в области истории архитектуры станет более точным. В любом случае, не только научное сообщество, но и более широкая аудитория получит новый инструмент наглядности, для изменения взгляда или точки зрения историка архитектуры, подразумевающий вариативность.

Это и «микроскоп», чтобы рассмотреть старинный план города вплоть до деталей отдельных фасадов, и «коллайдер» для архитектора – квантового физика, или просто любящего новые технологии, позволяющий наглядно и относительно подробно рассмотреть альтернативную ветку развития реальности. И как любой новый творческий инструмент, этот позволит создавать реальные или альтернативные, заурядные и гениальные картины бытия. Сложность работы по созданию целых новых миров, описанная выше может быть возложена на плечи ИИ в её рутинных разделах. Это распределение труда способно принести как сомнения в плане креативности ИИ, так и парадоксальную быстроту в построении виртуальных городов при правильном распределении ролей. Вся надежда на художника, архитектора и учёного в руки которого попадут эти инструменты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Строганова Л. А., Веретенникова А. А. Применение иммерсивных технологий в дизайне и архитектуре // Состояние, проблемы и перспективы развития современных социально-экономических процессов. Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2021. С. 63-78.
2. Чистяков А.В. Интерактивное виртуальное прототипирование в архитектурном проектировании // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2017. Т. 17. №. 4. С. 74-78. DOI: 10.14529/build170411
3. Руденко, М.П. Способы виртуальной реконструкции памятников архитектуры // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. 2015. № 1-2(8-9). С. 110-117. EDN XSASKP.
4. Herold H., Hecht R. 3D reconstruction of urban history based on old maps // Digital Research and Education in Architectural Heritage: 5th Conference, DECH 2017, and First Workshop, UHDL 2017, Dresden, Germany, March 30-31, 2017, Revised Selected Papers 1. Springer International Publishing, 2018. С. 63-79. DOI: 10.1007/978-3-319-76992-9_5
5. Хапаев В.В., Бацура И.В. Компьютерная 3D реконструкция античного и средневекового города Херсонес Таврический: опыт, проблемы и перспективы // Историческая информатика. 2018. № 4. С. 39-56. DOI: 10.7256/2585-7797.2018.4.28489
6. Бородин Л.И. и др. Виртуальная реконструкция Московского Страстного монастыря (XVII-XX вв.): комплексное использование технологий 3D-моделирования // Информационный бюллетень ассоциации История и компьютер. 2015. № 44. С. 8-12. EDN YMJPPU.
7. Маландина Т.В. Виртуальная 3D-реконструкция интерьеров подмосковных усадеб XVIII – начала XX веков: парадные интерьеры усадебного комплекса Никольское-Урюпино // Историческая информатика. 2021. № 2. С. 134-170. DOI: 10.7256/2585-7797.2021.2.36029
8. Notre Dame Cathedral's restoration is imagined through digital scans by architectural historian Andrew Tallon [Электронный ресурс]. URL: <https://archinect.com/news/article/150132307/notre-dame-cathedral-s-restoration-is-imagined-through-digital-scans-by-architectural-historian-andrew-tallon> (дата обращения: 8.08.2024).
9. Ledoux H, Biljecki F, Dukai B, Kumar K, Peters RY, Stoter JE et al. 3dfier: automatic reconstruction of 3D city models. // Journal of Open Source Software. 2021. №6(57) Article 2866. DOI: 10.21105/joss.02866
10. Pompeii - a 3DRevival — Lund University [Электронный ресурс]. URL: <https://portal.research.lu.se/en/projects/pompeii-a-3d-revival> (дата обращения: 8.08.2024).
11. The real history behind the most impressive landmarks in Assassin's Creed Origins [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pcgamer.com/the-real-history-behind-the-most-impressive-landmarks-in-assassins-creed-origins/> (дата обращения: 8.08.2024).
12. L. Ragia, F. Sarri and K. Mania. 3D reconstruction and visualization of alternatives for restoration of historic buildings: A new approach. // 1st International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management (GISTAM), Barcelona, Spain, 2015, pp. 1-9.
13. В Белокаменном подклете Старого Английского двора откроется выставка «Зарядье. Архивы возможного» // Сайт мэра Москвы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mos.ru/news/item/129328073/> (дата обращения: 8.08.2024).

14. Ярградфорум и 3D Ярославль. Новости Vimania [Электронный ресурс]. URL: <https://vimania.ru/w/blog/2022/08/25/> (дата обращения: 10.08.2024).
15. 3D Москва, утерянная или невоплощённая. Дзен.ру [Электронный ресурс]. URL: <https://dzen.ru/a/ZkIKvL5L0A2WZtpR> (дата обращения: 10.08.2024).
16. Коренев В.И. Использование цифровых технологий и 3D-моделирования в градостроительной деятельности (на примере города Томска) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 6. С. 70-82. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-6-70-82
17. Buyukdemircioglu M., Kocaman S. Reconstruction and efficient visualization of heterogeneous 3D city models // Remote Sensing. 2020. Т. 12. №. 13. С. 2128. DOI: 10.3390/rs12132128
18. Yilmaz H. M. et al. Importance of digital close-range photogrammetry in documentation of cultural heritage // Journal of Cultural Heritage. 2007. Т. 8. №. 4. С. 428-433. DOI: 10.1016/j.culher.2007.07.004
19. Шестопалова О.Л., Шестопалов Р.П. Об интеграции BIM-технологии информационного моделирования зданий с методами фотограмметрии при построении цифровых моделей объектов в архитектурно-строительной отрасли // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. №. 8. С. 138-143. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-138-144
20. Гарифуллин А.Р., Майоров Н.Д., Фролов В.А. Дифференцируемые процедурные модели для реконструкции 3D-моделей по одному изображению // Графикон-конференции по компьютерной графике и зрению. 2023. Т. 33. С. 14-24.
21. Croce V. et al. H-BIM and artificial intelligence: classification of architectural heritage for semi-automatic scan-to-BIM reconstruction // Sensors. 2023. Т. 23. №. 5. С. 2497. DOI: 10.3390/s23052497
22. Bifrost for Autodesk Maya 2025. Autodesk [Электронный ресурс]. URL: <https://www.autodesk.com/products/maya/bifrost> (дата обращения: 8.08.2024).
23. NVIDIA RTX GPU ускоряют новые алгоритмы ИИ в Adobe Substance Alchemist и Blender [Электронный ресурс]. URL: <https://render.ru/ru/news/post/18206> (дата обращения: 8.08.2024).
24. 3 essential ZBrush retopology techniques. TheFastCode [Электронный ресурс]. URL: <https://www.thefastcode.com/en-try/article/3-essential-zbrush-retopology-techniques> (дата обращения: 8.08.2024).
25. Jie S., Zhixin L. I., Wenyuan Z. Recent progress in large-scale 3D city modeling // Acta Geodaetica et Cartographica Sinica. 2019. Т. 48. №. 12. С. 1523. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190471
26. Lei, B., Stouffs, R., & Biljecki, F. (2022). Assessing and benchmarking 3D city models. // International Journal of Geographical Information Science, 37(4), 788–809. DOI: 10.1080/13658816.2022.2140808
27. Собрание фасадов, Его Императорским Величеством Высочайше апробованных для частных строений в городах Российской Империи. 1809—[1812] года. Части I—V. С.-Петербург, 1809—1812. 287 с.
28. Biljecki F., Ledoux H., Stoter J. Generating 3D city models without elevation data // Computers, Environment and Urban Systems. 2017. Т. 64. С. 1-18. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2017.01.001
29. Plan de Moscou - Plan von Moskau v.2 1:10K 1812. Retromap [Электронный ресурс]. URL: https://retromap.ru/0818125_0420092_55.751776,37.611501 (дата обращения: 8.08.2024).
30. Виды Москвы в гравюрах 19 века. Дом Н.В. Гоголя - мемориальный музей и научная библиотека [Электронный ресурс]. URL: <https://gogol.museum-online.moscow/entity/ALBUM/3557470> (дата обращения: 8.08.2024).
31. PastVu - ретроспектива среды обитания человечества: [Электронный ресурс]. URL: <https://pastvu.com/> (дата обращения: 8.08.2024).
32. 3D-модель Москвы 1812-1912 гг. Портал «Архитектура и энтропия» [Электронный ресурс]. URL: <https://cih.ru/lb/index.html> (дата обращения: 10.08.2024).
33. Исчезнувшие достопримечательности Ярославля. Журнал «ЦИХ journal» [Электронный ресурс]. URL: <https://cih.ru/j3/726.html> (дата обращения: 10.08.2024).
34. Москва, которой не было, 1920—1970. Портал «Архитектура и энтропия» [Электронный ресурс]. URL: <https://cih.ru/lb/m2.html> (дата обращения: 10.08.2024).
35. Мастер, Маргарита и Москва, которой не было. Дзен.ру [Электронный ресурс]. URL: <https://dzen.ru/a/Zcuijvq3VBaFpRs> (дата обращения: 10.08.2024).

REFERENCES

1. Stroganova L.A., Veretennikova A.A. *Primeneniye immersivnykh tekhnologiy v dizayne i arkhitekture* [Application of immersive technologies in design and architecture] *State, problems and prospects for the development of modern socio-economic processes*. Petrozavodsk: MCNP "New Science", 2021. Pp. 63-78. (rus).
2. Chistyakov A.V. *Interaktivnoye virtual'noye prototipirovaniye v arkhitekturnom proyektirovanii* [Interactive virtual prototyping in architectural design] *Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and architecture*. 2017. Vol. 17. No. 4. Pp. 74-78. (rus). DOI: 10.14529/build170411

3. Rudenko, M.P. Sposoby virtual'noy rekonstruktsii pamyatnikov arkhitektury [Methods of virtual reconstruction of architectural monuments] *Systems analysis and information technologies in the sciences of nature and society*. 2015. No. 1-2 (8-9). Pp. 110-117. (rus). EDN XSASKP
4. Herold H., Hecht R. 3D reconstruction of urban history based on old maps. Digital Research and Education in Architectural Heritage: 5th Conference, DECH 2017, and First Workshop, UHDL 2017, Dresden, Germany, March 30-31, 2017, Revised Selected Papers 1. Springer International Publishing, 2018. Pp. 63-79. DOI: 10.1007/978-3-319-76992-9_5
5. Khapaev V.V., Batsura I.V. Komp'yuternaya 3D rekonstruktsiya antichnogo i srednevekovogo goroda Khersones Tavricheskiy: opyt, problemy i perspektivy [Computer 3D reconstruction of the ancient and medieval city of Tauric Chersonesos: experience, problems and prospects] *Historical informatics*. 2018. No. 4. Pp. 39-56. (rus). DOI: 10.7256/2585-7797.2018.4.28489
6. Borodkin L.I. et al. Virtual'naya rekonstruktsiya Moskovskogo Strastnogo monastyrya (XVII-XX vv.): kompleksnoye ispol'zovaniye tekhnologiy 3D-modelirovaniya [Virtual reconstruction of the Moscow Passion Monastery (XVII-XX centuries): complex use of 3D modeling technologies] *Information bulletin of the History and Computer association*. 2015. No. 44. Pp. 8-12. (rus). EDN YMJPPU.
7. Malandina T.V. Virtual'naya 3D-rekonstruktsiya inter'yerov podmoskovnykh usadeb XVIII – nachala XX vekov: paradnyye inter'yery usadebnogo kompleksa Nikol'skoye-Uryupino [Virtual 3D reconstruction of the interiors of Moscow region estates of the 18th – early 20th centuries: ceremonial interiors of the Nikolskoye-Uryupino estate complex]. *Historical informatics*. 2021. No. 2. Pp. 134-170. (rus). DOI: 10.7256/2585-7797.2021.2.36029
8. Notre Dame Cathedral's restoration is imagined through digital scans by architectural historian Andrew Tallon [Online]. URL: <https://archinect.com/news/article/150132307/notre-dame-cathedral-s-restoration-is-imagined-through-digital-scans-by-architectural-historian-andrew-tallon> (date of application: 8.08.2024).
9. Ledoux H, Biljecki F, Dukai B, Kumar K, Peters RY, Stoter JE et al. 3dfier: automatic reconstruction of 3D city models. *Journal of Open Source Software*. 2021. No. 6 (57) Article 2866. DOI: 10.21105/joss.02866
10. Pompeii - a 3DRevival. Lund University [Online]. URL: <https://portal.research.lu.se/en/projects/pompeii-a-3d-revival> (date of application: 8.08.2024).
11. The real history behind the most impressive landmarks in Assassin's Creed Origins [Online]. URL: <https://www.pcgamer.com/the-real-history-behind-the-most-impressive-landmarks-in-assassins-creed-origins/> (date of application: 8.08.2024).
12. L. Ragia, F. Sarri and K. Mania. 3D reconstruction and visualization of alternatives for restoration of historic buildings: A new approach. 1st International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management (GISTAM), Barcelona, Spain, 2015, pp. 1-9.
13. V Belokamennom podklete Starogo Angliyskogo dvora otkroyetsya vystavka «Zaryad'ye. Arkhivy vozmozhnogo» [The exhibition "Zaryadye. Archives of the Possible" will open in the White Stone Basement of the Old English Court]. Moscow Mayor's Website (rus). [Online]. URL: <https://www.mos.ru/news/item/129328073/> (date of application: 8.08.2024).
14. Yargradforum i 3D Yaroslavl' [Yargradforum and 3D Yaroslavl] Vimania News (rus). [Online]. URL: <https://vimania.ru/w/blog/2022/08/25/> (date of application: 10.08.2024).
15. 3D Moskva, uteryannaya ili nevoploshchonnaya [3D Moscow, lost or unrealized]. Dzen.ru (rus). [Online]. URL: <https://dzen.ru/a/ZkIKvL5L0A2WZtpR> (date of application: 10.08.2024).
16. Korenev V.I. Ispol'zovaniye tsifrovyykh tekhnologiy i 3D-modelirovaniya v gradostroitel'noy deyatel'nosti (na primere goroda Tomsk) [Use of digital technologies and 3D modeling in urban planning activities (on the example of the city of Tomsk)]. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2020. Vol. 22. No. 6. Pp. 70-82 (rus). DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-6-70-82
17. Buyukdemircioglu M., Kocaman S. Reconstruction and efficient visualization of heterogeneous 3D city models. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. No. 13. Article 2128. DOI: 10.3390/rs12132128
18. Yilmaz H. M. et al. Importance of digital close-range photogrammetry in documentation of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*. 2007. Vol. 8. No. 4. Pp. 428-433. DOI: 10.1016/j.culher.2007.07.004
19. Shestopalova O.L., Shestopalov R.P. Ob integratsii BIM-tekhnologii informatsionnogo modelirovaniya zdaniy s metodami fotogrammetrii pri postroyenii tsifrovyykh modeley ob'yektov v arkhitekturno-stroitel'noy otrasli [On the integration of BIM technology for building information modeling with photogrammetry methods in the construction of digital models of objects in the architectural and construction industry]. *Bulletin of Tula State University. Technical sciences*. 2022. No. 8. Pp. 138-143 (rus). DOI: 10.24412/2071-6168-2022-8-138-144
20. Garifullin A.R., Mayorov N.D., Frolov V.A. Differentsiruyemyye protsedurnyye modeli dlya rekonstruktsii 3D-modeley po odnomu izobrazheniyu [Differentiable procedural models for reconstruction of 3D models from a single image]. *Graphicon conferences on computer graphics and vision*. 2023. Vol. 33. Pp. 14-24 (rus).
21. Croce V. et al. H-BIM and artificial intelligence: classification of architectural heritage for semi-automatic scan-to-BIM reconstruction. *Sensors*. 2023. Vol. 23. No. 5. Article 2497. DOI: 10.3390/s23052497

22. Bifrost for Autodesk Maya 2025. Autodesk [Online]. URL: <https://www.autodesk.com/products/maya/bifrost> (date of application: 8.08.2024).
23. NVIDIA RTX GPU uskoryayut novyye algoritmy II v Adobe Substance Alchemist i Blender [NVIDIA RTX GPUs Accelerate New AI Algorithms in Adobe Substance Alchemist and Blender] (rus). [Online]. URL: <https://render.ru/ru/news/post/18206> (date of application: 8.08.2024).
24. 3 essential ZBrush retopology techniques. TheFastCode [Online]. URL: <https://www.thefastcode.com/entry/article/3-essential-zbrush-retopology-techniques> (date of application: 8.08.2024).
25. Jie S., Zhixin L. I., Wenyuan Z. Recent progress in large-scale 3D city modeling. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*. 2019. Vol. 48. No. 12. Article 1523. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190471
26. Lei, B., Stouffs, R., & Biljecki, F. Assessing and benchmarking 3D city models. *International Journal of Geographical Information Science*, 2022. 37(4), 788–809. DOI: 10.1080/13658816.2022.2140808
27. Sobraniye fasadov, Yego Imperatorskim Velichestvom Vysochayshe aprobovannykh dlya chastnykh stroyeniy v gorodakh Rossiyskoy Imperii [Collection of facades, approved by His Imperial Majesty for private buildings in the cities of the Russian Empire]. 1809-[1812]. Parts I-V. St. Petersburg, 1809-1812. 287 p.
28. Biljecki F., Ledoux H., Stoter J. Generating 3D city models without elevation data. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2017. Vol. 64. Pp. 1-18. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2017.01.001
29. Moscow Plan - Plan von Moskau v.2 1:10K 1812. Retromap [Online]. URL: https://retromap.ru/0818125_0420092_55.751776,37.611501 (date of application: 8.08.2024).
30. Vidy Moskvyy v gravyrakh 19 veka. Dom N.V. Gogolya - memorial'nyy muzey i nauchnaya biblioteka [Views of Moscow in 19th century engravings. N.V. Gogol's House - memorial museum and scientific library] (rus). [Online]. URL: <https://gogol.museum-online.moscow/entity/ALBUM/3557470> (date of application: 8.08.2024).
31. PastVu - retrospektiva sredy obitaniya chelovechestva [PastVu - A Retrospective of Human Habitat] (rus). [Online]. URL: <https://pastvu.com/> (date of application: 8.08.2024).
32. 3D-model' Moskvyy 1812-1912 gg. [3D model of Moscow 1812-1912]. Portal "Architecture and Entropy" (rus). [Online]. URL: <https://cih.ru/lb/index.html> (date of application: 10.08.2024).
33. Ischeznuvshiy dostoimechatel'nosti Yaroslavlya [Disappeared landmarks of Yaroslavl]. "CIH journal" (rus). [Online]. URL: <https://cih.ru/j3/726.html> (date of application: 10.08.2024).
34. Moskva, kotoroy ne bylo, 1920—1970. [Moscow That Never Was, 1920-1970] Portal "Architecture and Entropy" (rus). [Online]. URL: <https://cih.ru/lb/m2.html> (date of application: 10.08.2024).
35. Master, Margarita i Moskva, kotoroy ne bylo [The Master, Margarita and the Moscow That Never Was]. Dzen.ru (rus). [Online]. URL: <https://dzen.ru/a/Zcuijvq3VBaFpRs> (date of application: 10.08.2024).

Информация об авторе

Расторгуев Семён Васильевич

Ярославский государственный технический университет, г. Ярославль, Россия,
Старший преподаватель кафедры «Архитектура», основатель и главный редактор ведущего российского интернет-портала о концептуальной и футуристической архитектуре.

Information about author

Rastorguev Semyon V.

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia,
Senior Lecturer, Department of Architecture, founder and editor-in-chief of the leading Russian Internet portal on conceptual and futuristic architecture.

А.А. БАРУЗДИН¹, Л.В. ЗАКРЕВСКАЯ¹

¹Владимирский Государственный Университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия

РЕЦИКЛИНГ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Разработано технологическое решение обеспечивающее получение композиционного строительного материала на основе отходов сшитого полиэтилена и боя керамического кирпича. Выявлен характер влияния сшитого полиэтилена на прочностные и деформативные характеристики композита. Проведено сравнение характера разрушения композитов на основе полиэтиленовых гранул, отходов сшитого полиэтилена, кестробетона и традиционного бетона. Выявлено, что характер разрушения предлагаемых композитов больше соответствует традиционному бетону, при этом предел прочности на сжатие составляет 20-40 МПа в зависимости от содержания сшитого полиэтилена. Оценена адгезия заполнителя в виде сшитого полиэтилена к цементной матрице. Установлено, что заполнитель в виде сшитого полиэтилена обладает хорошим сцеплением с цементной матрицей за счет неправильной формы частиц, шероховатости поверхности и наличия в составе сшитого полиэтилена технического углерода. Измеренное значение адгезии поверхности частиц сшитого полиэтилена к цементной матрице составило 0,98 МПа, что сопоставимо с адгезией цементной матрицы к полированной поверхности каменных заполнителей. Дано объяснение формированию гетерогенной прочной структуры за счет механического и химического взаимодействия компонентов.

Ключевые слова: рециклинг, сшитый полиэтилен, кирпичный бой, прочность, модуль деформации, характер разрушения, адгезия.

A.A. BARUZDIN¹, L.V. ZAKREVSKAYA¹

¹ Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov, Vladimir, Russia

RECYCLING OF CROSS-LINKED POLYETHYLENE TO CREATE COMPOSITE BUILDING MATERIALS

Abstract. A technological solution of the production of composite building material based on waste cross-linked polyethylene and ceramic brick has been developed. The nature of the influence of cross-linked polyethylene on the strength and deformation characteristics of the composite is revealed. The nature of the destruction of composites based on polyethylene granules, waste of cross-linked polyethylene, hempcrete and traditional concrete is compared. It was revealed that the nature of the destruction of the proposed composites corresponds more to traditional concrete than to hempcrete, while the compressive strength is 20-40 MPa, depending on the content of crosslinked polyethylene. The adhesion of the aggregate in the form of cross-linked polyethylene to the cement matrix was evaluated. It was found that the aggregate in the form of cross-linked polyethylene has good adhesion to the cement matrix due to the irregular shape of the particles, surface roughness and the presence of carbon black in the composition of cross-linked polyethylene. The measured value of adhesion of the surface of cross-linked polyethylene particles to the cement matrix was 0.98 MPa, which is comparable to the adhesion of the cement matrix to the polished surface of natural aggregates. An explanation for the formation of a heterogeneous durable structure due to the physical and chemical interaction of the components is given.

Keywords: recycling, cross-linked polyethylene, brick scrap, strength, modulus of deformation, nature of destruction, adhesion.

Введение

В настоящее время большую популярность получают композиционные материалы на основе органических заполнителей природного происхождения под общим названием арболит. Это разновидность легкого бетона на основе минерального вяжущего и органического заполнителя, такого как древесина. Основные достоинства данного материала: экологичность, низкая плотность ($400-850 \text{ кг/м}^3$), малая теплозвукопроводность, хорошая обрабатываемость, высокая морозо- и биостойкость. Прочность арболита на сжатие может достигать 5 МПа, в то время как прочность на изгиб изменяется от 0,7 до 1 МПа. Наряду с достоинствами арболит имеет и ряд недостатков. Содержащиеся в нем в большом количестве древесные материалы склонны быстро накапливать влагу, а также арболит чувствителен к качеству исходного сырья и изменению состава [1,2].

Вышеперечисленных недостатков могут быть лишены легкие бетоны на основе органического синтетического сырья.

Учеными со всего мира ведутся исследования, направленные на применение отходов полимеров в качестве заполнителей различных композиционных материалов на неорганическом вяжущем.

Авторы [3-4] отмечают, что при добавлении в состав растворов, бетонов пластиковых волокон в количестве 1-2% имеет место улучшение механических характеристик материалов.

При полной или частичной замене натурального заполнителя на заполнитель из полимерных отходов происходит понижение плотности бетона, снижается прочность при сжатии и изгибе, что по мнению большинства ученых связано с пониженной адгезией полимерных частиц к цементной матрице, ограниченной гидратацией цемента вблизи пластиковых частиц, несоответствием модуля упругости матрицы и заполнителя [5-6]. Помимо этого, растворы с добавлением пластиковых отходов более стойки в кислых средах, обладают пониженным проникновением хлорид ионов и меньше подвержены растрескиванию вследствие усадки [6-7].

Одним из видов полимерных строительных отходов являются отходы труб, кабелей и изоляции, изготовленные из сшитого полиэтилена. Данный вид отходов обладает рядом особенностей. Благодаря технологии сшивки молекулы полиэтилена образуют пространственную структуру, которая увеличивает термостойкость, диэлектрические и механические свойства полиэтилена, однако по этой же причине затруднена переработка таких отходов традиционными для полимеров методами. Поэтому значительная часть отходов сшитого полиэтилена складывается на полигонах [8].

Отходы сшитого полиэтилена также возможно использовать в качестве заполнителя при производстве бетонов и композиционных материалов на неорганическом вяжущем. При этом происходит снижение прочности бетона на сжатие, растяжение и изгиб, уменьшается модуль упругости и увеличивается усадка. Положительными эффектами от введения в состав бетона отходов сшитого полиэтилена являются снижение водопоглощения и плотности образцов. Такое изменение свойств авторы [9] связывают со снижением жесткости каркаса бетона вследствие включения отходов сшитого полиэтилена, пониженным удельным весом и водопоглощением самого полиэтиленового заполнителя, а также его плохой адгезией к цементной матрице.

Отходы на основе сшитого полиэтилена в своем составе зачастую содержат небольшое количество технического углерода, который может положительно влиять на свойства композиций на основе неорганических вяжущих.

Авторами работ [10,11] было установлено, что при концентрации технического углерода 0,005% от массы цемента прочность бетона на изгиб и сжатие повышается до 50,25%. Отмечается, что образцы без технического углерода имеют значительное количество мелких пор. В то время как образцы, модифицированные свежеприготовленной дисперсией технического углерода, имеют плотную и ровную зону контакта цементной матрицы с заполнителем.

Введение технического углерода в состав бетона приводит к его структурированию, увеличению плотности упаковки зерен цементной матрицы, уплотнению контактных слоев на границе матрицы и заполнителя, а также интенсификации процесса гидратации цемента с образованием гидросиликатов кальция меньшей основности за счет введения ультрадисперсной сажи. Данные эффекты по степени модификации цементной матрицы сопоставимы с дисперсиями углеродных нанотрубок [10-11].

Отличительной чертой, как композитов на основе отходов древесины, так и композитов на основе отходов полимеров, является характер поведения композитов под разрушающей нагрузкой. Не наблюдается типичного хрупкого разрушения как в случае с традиционным бетоном, характер поведения под нагрузкой становится более пластичным. Испытуемый образец деформируется, сжимается без видимых признаков разрушения [12].

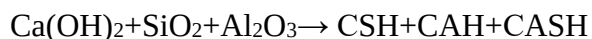
В данной работе предпринята попытка описать характер разрушения композитов на основе неорганических вяжущих и полимерных отходов.

В качестве вяжущего в таких композитах могут выступать цемент, известь, цемент Сореля, гипс и т. д.

Весьма перспективным в этом отношении может быть синтез комплексного вяжущего вещества на основе рециклинга в строительстве состоящего из цемента и отходов кирпича керамического в виде тонкомолотой составляющей.

Частицы тонкомолотого кирпича играют роль дополнительных центров кристаллизации, позволяющих ускорить процесс образования новой фазы и способствующей наиболее полной организации системы.

Тонкомолотая составляющая отходов керамического кирпича имеет удельную поверхность от 2500 см²/г. Благодаря размеру частиц добавки соразмерному с размером частиц вяжущего ($S_{уд}=3000-4000$ см²/г) и наличию в составе молотого кирпича SiO₂, Al₂O₃, происходит уплотнение и упрочнение структуры композиционного материала за счет взаимодействия портландита (Ca(OH)₂) и указанных оксидов и образования гидросиликатов и гидроалюминатов кальция, по следующим схемам[13,14]:



В качестве добавок улучшающих свойства композитов рационально применять пластификаторы и растворы электролитов.

Добавки пластификаторы, в частности П-17, способны адсорбироваться на поверхности частиц вяжущего вещества и новообразований, понижая поверхностное натяжение и позволяя снизить водоцементное соотношение и как следствие повысить прочность композитов.

Добавки электролитов, в частности, CaCl₂ в свою очередь приводят к пересыщению раствора и укрупнению частиц, и ускорению их твердения и повышению (ранней) прочности цементного камня. В системах с добавками электролитов происходит переход коагуляционной структуры в кристаллизационную на ранних стадиях гидратации и твердения.

В данной работе произведена разработка составов композиционных материалов на основе портландцемента, отходов сшитого полиэтилена, кирпичного боя, а также добавки белой сажи, пластификатора П-17 и раствора CaCl₂. Выявлен характер влияния отходов сшитого полиэтилена на свойства композита, также произведено сравнение характера разрушения разработанных композитов на основе сшитого полиэтилена, композитов с заполнителем виде полиэтиленовых гранул, костробетона и обычного бетона.

Также, в работе оценена адгезия заполнителя в виде отходов сшитого полиэтилена к цементной матрице. Один из важных факторов долговечности бетона это хорошее сцепление в зоне контакта заполнителя и цементной матрицы. В случае заполнителей из полимерных

отходов, которые химически не взаимодействуют с вяжущим контактный слой практически отсутствует. Сцепление заполнителя с цементным камнем в этом случае осуществляется в основном за счет неровностей поверхности.

По данным обзоров [15,16] сцепление цементного камня с полированной поверхностью известняка, гранита, песчаника составляет от 0,6 до 0,9 МПа. А при шероховатой поверхности порядка 1 – 1,8 МПа, таким образом, изменение сцепления может составлять до 1,5-2 раз.

Материалы и методы

Исследования проводились на базе кафедры СП ВлГУ имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых с помощью современного оборудования и приборов, таких как пресс ПИ-2000-II производства компании «МЕТРОТЕСТ», машина для определения прочности при изгибе МИИ-100, смеситель лабораторный ЗУБР-1400, прибор для измерения удельной поверхности и среднего размера частиц ПСХ-10, лабораторная мельница ЛМ-2, стандартный конус ПГР для определения подвижности смеси, прибор Вика, формы для образцов-балочек 16x4x4 см, набор сит, оптический микроскоп МБС-9, сканирующий электронный микроскоп FIB-SEM LMI-700. Рентгенофазовый анализ проводился на порошковом дифрактометре Bruker AXS D8 ADVANCE (модель D8, фирма-производитель: «Bruker Optik GmdH», Германия).

Отходы кирпичного боя дробились с помощью ручного инструмента на куски менее 5-10 мм и подвергались помолу на лабораторной мельнице, представленной на рисунке 1а. Помол велся до прохождения крошки кирпича через сито 0,08 мм и достижения удельной поверхности $S_{уд} = 2500 \text{ см}^2/\text{г}$.

Содержание тонкомолотых отходов боя керамического кирпича во всех образцах поддерживалось на уровне 20% от содержания цемента. Данное значение было выбрано на основании предыдущих экспериментов и исследований авторов, по результатам которых было установлено, что замена цемента тонкомолотой кирпичной крошкой до 20% безболезненно сказывается на основных свойствах композитов (прочность, плотность, водопоглощение).

Измельчение отходов сшитого полиэтилена производилось с помощью измельчителя для пластмасс XFS-300 представленном на рисунке 1б. Для достижения наилучшего результата каждую партию полиэтилена подвергали дроблению несколько раз, после чего отсеивали наименьшую фракцию 2,5-5 мм, а остаток на сите отправляли на повторное измельчение.



Рисунок 1 – Оборудование для подготовки отходов: а) лабораторная мельница ЛМ-2, б) измельчитель для пластмасс XFS-300

В таблице 1 приведены свойства материалов использовавшихся для синтеза композитов на основе отходов сшитого полиэтилена.

Таблица 1 – Свойства используемых материалов

Материалы	Свойства
Портландцемент ПЦБ 1-500-Д0	Цемент белый, без добавок, марки 500, $S_{уд} > 460 \text{ м}^2/\text{кг}$
Кирпичная крошка	Фракция менее 0,08 мм; $S_{уд}=2500 \text{ см}^2/\text{г}$; $\rho_{нас}=820 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{ист}=2650 \text{ кг/м}^3$;
Отходы сшитого полиэтилена	Фракция 2,5-5 мм
Белая сажа БС-120	$S_{уд}=120 \text{ м}^2/\text{г}$; Массовая доля $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} - 87\%$
Пластификатор П-17	50%-ный раствор, плотностью $\geq 1,1 \text{ г/см}^3$

На рисунке 2 представлено исследование структуры отходов сшитого полиэтилена с помощью рентгенофазового анализа.

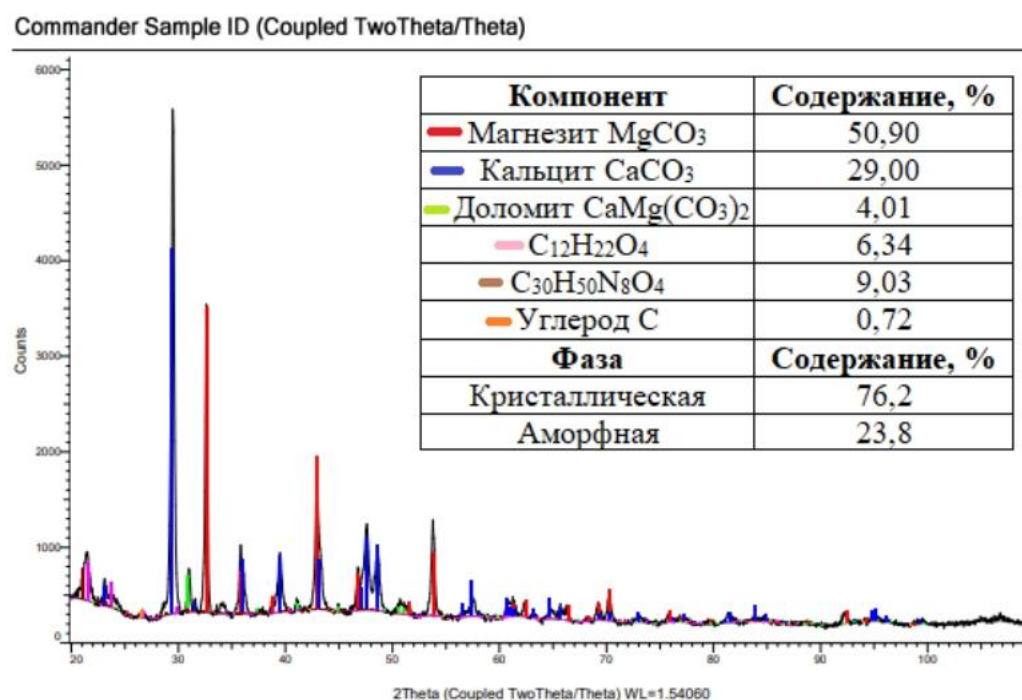


Рисунок 2 – Исследование структуры отходов сшитого полиэтилена с помощью рентгенофазового анализа

Из результатов анализа можно сделать вывод, что в составе сшитого полиэтилена содержится технический углерод, который при взаимодействии с цементной матрицей может улучшать ее структуру и уплотнять зону контакта с заполнителем.

Наличие органических соединений свидетельствуют о возможной сшивке методом азотирования. Минеральная часть в виде магнезита, кальцита и доломита очевидно присутствует из-за применения их при сшивке. Роль каждого из этих компонентов предстоит изучить при дальнейших исследованиях, бесспорно их присутствие сказывается на улучшении механических свойств композита.

На рисунке 3 представлен внешний вид отходов сшитого полиэтилена и результаты исследования их структуры с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ).

На рисунке 3а видно, что дробленые отходы сшитого полиэтилена представлены частицами неправильной формы с неровной, шероховатой поверхностью. Эти же факты подтверждаются и исследованиями частиц с помощью растровой электронной микроскопии

(РЭМ). Частицам отходов сшитого полиэтилена присущи микропустоты и поры (рис.3б), значительная неровность, шероховатость поверхности (рис.3в) и волокнистая разветвленная структура (рис.3г). Все эти данные могут явиться причиной неплохой механической адгезии частиц дробленого сшитого полиэтилена к цементной матрице вопреки данным авторов [5,9].

Механические испытания проводились с использованием прессы ПИ-2000-II компании «МЕТРОТЕСТ» (прикладывает нагрузку до 2000 кН, относительная погрешность силоизмерителя $\pm 1\%$, перемещение подвижной плиты до 360 мм, абсолютная погрешность измерения перемещения подвижной плиты при перемещениях до 10 мм - $\pm 0,1$ мм).

Для сравнения характера разрушения испытуемых материалов помимо образцов композита на основе отходов кирпичного боя и сшитого полиэтилена были изготовлены образцы традиционного бетона и костробетона.

Образцы доводились до разрушения и по результатам испытания, были получены графики зависимости укорочения образца от нагрузки, которые затем были преобразованы в диаграммы напряжений при сжатии.

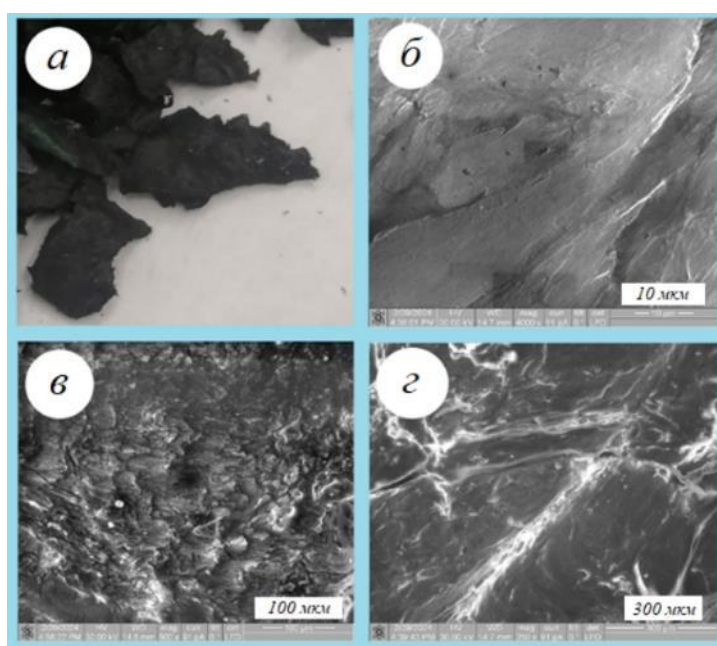


Рисунок 3 - Внешний вид отходов сшитого полиэтилена и результаты исследования их структуры с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ): а) внешний вид частиц сшитого полиэтилена, б,в,г) исследование структуры отходов сшитого полиэтилена с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ)

Оценка адгезии заполнителя в виде дробленых отходов сшитого полиэтилена к цементной матрице производилась с помощью прибора ПСО-МГ4 по следующей методике: изготавливался образец цементной матрицы размером $16 \times 16 \times 4$ см, на поверхность которого в центре в процессе был нанесен равномерный слой частиц сшитого полиэтилена; после этого по прошествии 28 суток к покрытию из частиц сшитого полиэтилена на двухкомпонентный клей была приклеена отрывная пластина размером 30×30 мм и измерено усилие отрыва пластины. Схематически методика измерения адгезии представлена на рисунке 4.

Адгезия частиц сшитого полиэтилена к цементной матрице была вычислена по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

где F – усилие отрыва пластины, кН;

S – площадь отрывной пластины, см^2 ;

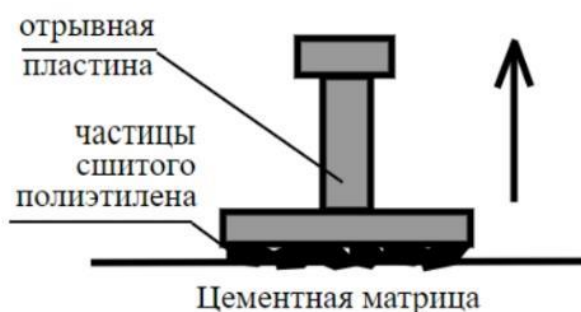


Рисунок 4 – Схема методики определения адгезии заполнителя в виде сшитого полиэтилена к цементной матрице

Результаты исследования и их анализ

В таблице 2 приведены составы образцов композиционных материалов на основе портландцемента и отходов кирпичного боя и сшитого полиэтилена.

В таблице 3 приведены свойства образцов синтезированных композиционных материалов.

Таблица 2 – Составы образцов композиционных материалов на основе портландцемента и отходов кирпичного боя и сшитого полиэтилена.

Марка состава	Компоненты, масс %					
	Портланд-цемент	Кирпичная крошка	Белая сажа	Сшитый полиэтилен	Пластификатор П-17	10%-ый раствор CaCl_2
КСП1	48,00	12,00	0,80	22,57	0,43	16,20
КСП2	49,00	12,25	0,80	20,95	0,45	16,55
КСП3	50,00	12,50	0,80	19,40	0,45	16,85
КСП4	52,50	13,13	0,80	15,40	0,47	17,70
КСП5	55,00	13,75	0,80	11,45	0,50	18,50
КСП6	56,00	14,00	0,80	9,80	0,50	18,90

Таблица 3 – Свойства образцов синтезированных композиционных материалов.

Марка состава	Наименование свойств			
	Плотность ρ , кг/м^3	Прочность на сжатие $R_{\text{сж}}$, МПа	Прочность на изгиб $R_{\text{изг}}$, МПа	Водопоглощение $W_{\text{масс}}$, %
КСП1	1762	20,4	4,0	2,13
КСП2	1787	23,1	4,3	2,05
КСП3	1799	26,6	4,3	2,30
КСП4	1813	37,0	4,6	1,86
КСП5	1943	41,6	4,5	2,23
КСП6	1961	43,5	4,8	2,02

На рисунках 5-6 представлены графики зависимости плотности и прочности синтезированных образцов от содержания отходов сшитого полиэтилена по массе.

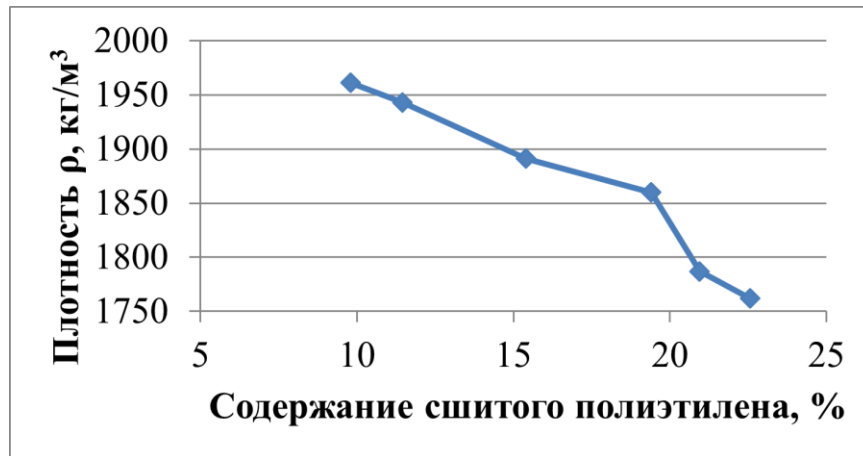


Рисунок 5 – График зависимости плотности синтезированных образцов от содержания отходов сшитого полиэтилена по массе

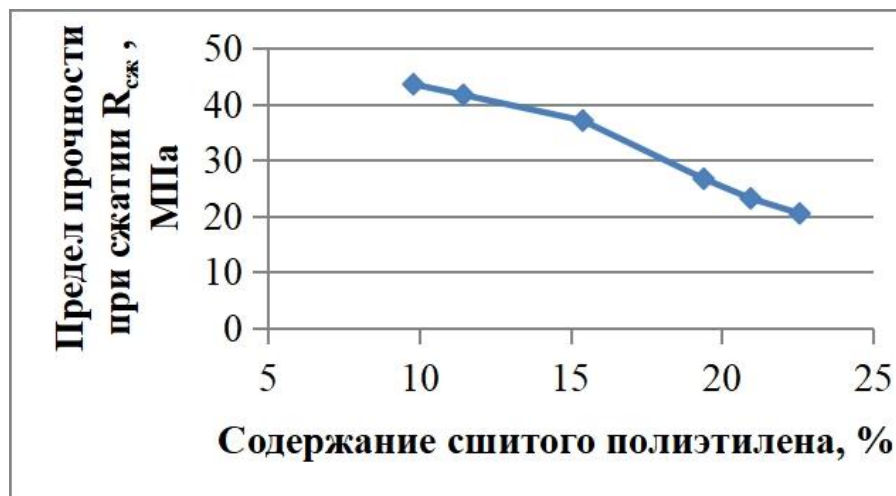


Рисунок 6 – Зависимость предела прочности на сжатие синтезированных образцов от содержания отходов сшитого полиэтилена по массе

Согласно результатам исследования свойств синтезированных образцов прочность материала на основе отходов сшитого полиэтилена и кирпичного боя уменьшается с увеличением доли содержания сшитого полиэтилена, при этом уменьшается плотность образцов.

На рисунках 7-8 представлены графики напряжений-деформаций для исследуемых композитов на основе отходов сшитого полиэтилена, для обычного бетона и для костробетона.

Построенные диаграммы свидетельствуют о том, что характер разрушения образцов синтезированного материала на основе отходов сшитого полиэтилена и кирпичного боя схож с характером разрушения традиционного бетона.

По разрушающей нагрузке предел прочности костробетона (2 МПа) на порядок отличается от двух других бетонов (20 и 26 МПа).

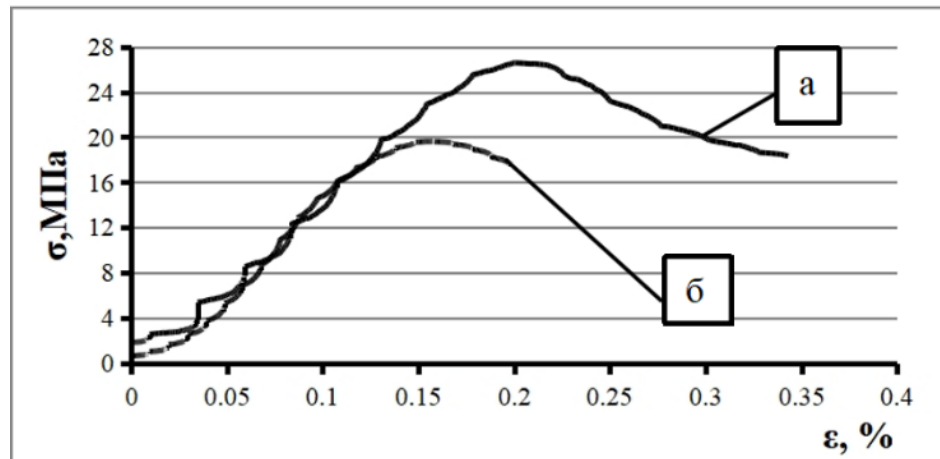


Рисунок 7– График деформаций-напряжений: а) композита с заполнителем на основе отходов сшитого полиэтилена, б) - традиционного бетона

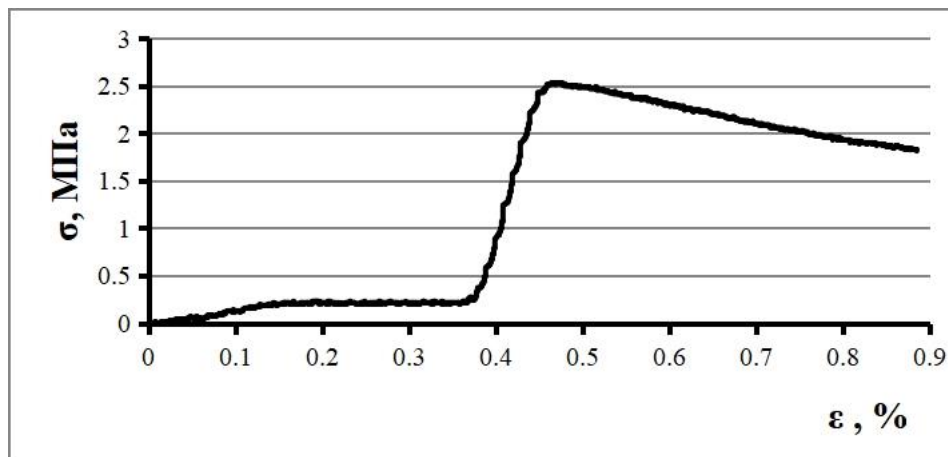


Рисунок 8 – График напряжений-деформаций костробетона

Упругие деформации композитов под нагрузкой характеризуются модулем упругости ($E = Fl/S\Delta l = \sigma/\epsilon$). Чем выше модуль упругости, тем меньше при данной нагрузке будет относительная деформация ($\epsilon = \Delta l/l_0$). Помимо факторов, связанных с качеством матрицы, модуль упругости композита зависит от содержания и качества заполнителя. Композиционные материалы можно рассматривать как конгломерат из двух компонентов: вяжущего (раствора) и заполнителя. Каждый из этих компонентов занимает в сечении материала определенную часть и участвует в восприятии нагрузки. Если прочность заполнителя в композиционных материалах не всегда полностью используется и, следовательно, не всегда проявляется, то модуль упругости заполнителя непременно отражается на модуле упругости материала.

Модуль упругости гранитного щебня, используемого в качестве заполнителя в обычном бетоне, составляет $E=50000$ МПа, что в 2 раза превышает модуль упругости цементной матрицы $E=25000$ МПа. Модуль упругости органических заполнителей на основе отходов костры конопли и отходов сшитого полиэтилена составляет $E=2000-3000$ МПа и $E=550$ МПа соответственно, что приводит к понижению модуля упругости композиционных материалов на их основе, и повышению пластичности, а следовательно, и изменению характера разрушения материала и его прочности.

В таблице 4 приведены значения модуля упругости при сжатии для традиционного бетона, костробетона и бетона с заполнителем из отходов сшитого полиэтилена, вычисленные по графикам деформаций-напряжений (рис.7, 8).

Сравнивая модули упругости испытанных образцов материалов, можно сделать вывод, что наименее деформативным из сравниваемых материалов является традиционный бетон, сопоставимым, но чуть меньшим модулем деформации обладает синтезированный композит с заполнителем в виде отходов сшитого полиэтилена и наименьшим модулем упругости, а следовательно, наибольшей деформативностью обладает костробетон. Таким образом, по характеру деформаций под нагрузкой синтезированный композиционный материал находится между костробетоном и традиционным бетоном, приближаясь по значению модуля упругости к традиционному бетону.

Таблица 4 - зависимость модуля упругости композитов от вида заполнителя

<i>Наименование материала</i>	<i>Наименование заполнителя</i>	<i>Значение модуля упругости E, МПа</i>
Костробетон	Костра технической конопли	3000
Бетон	Гранитный щебень	20000
Бетон с заполнителем из сшитого полиэтилена	Сшитый полиэтилен	16000

После испытания на прочность при сжатии из образца на основе отходов сшитого полиэтилена были отобраны частицы заполнителя для исследования с помощью оптической и растровой электронной микроскопии (рис.9,10).

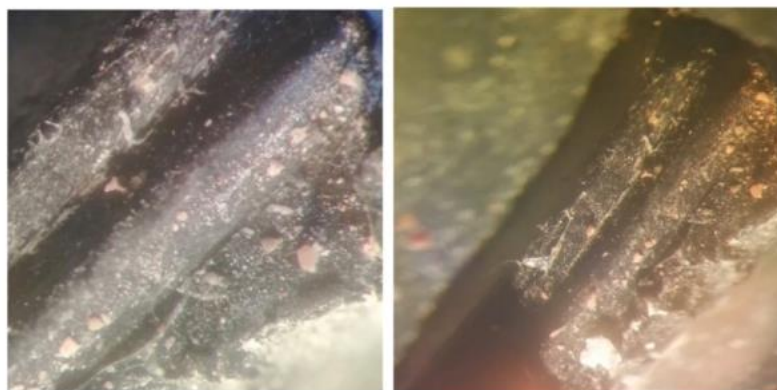


Рисунок 9 – Результаты исследования частиц сшитого полиэтилена с помощью оптической микроскопии после испытания образцов на сжатие

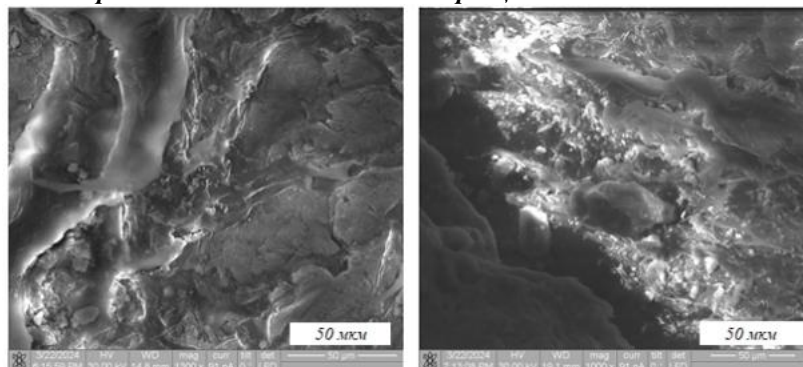


Рисунок 10 – Результаты исследования частиц сшитого полиэтилена с помощью растровой электронной микроскопии после испытания образцов на сжатие

Как видно из результатов исследования, неровности и шероховатости частиц сшитого полиэтилена, извлеченных из затвердевших образцов после испытания на сжатие покрыты продуктами гидратации цементной матрицы, что может говорить о наличии механической адгезии между частицами сшитого полиэтилена и цементной матрицей.

Для большей иллюстративности механического взаимодействия сшитого полиэтилена с цементной матрицей на рисунке 11 приведены снимки оптической микроскопии образцов с заполнителем из отходов сшитого полиэтилена и полиэтиленовых гранул.



Рисунок 11 – Результаты исследования структуры образцов: а) с заполнителем в виде полиэтиленовых гранул, б) с заполнителем в виде дробленых отходов сшитого полиэтилена

На представленных снимках видно, что полиэтиленовые гранулы обладают гладкой сферической формой (рис.11а), что, несомненно, влияет на отсутствие механической адгезии заполнителя и цементной матрицы, тогда как дробленые отходы сшитого полиэтилена за счет неправильной формы и шероховатой поверхности плотно встроены в структуру композита (рис.11б). Как известно полиэтилен прочный термопластичный полимер с переменной кристаллической структурой $((C_2H_4)_n)$, сшивка его обеспечивает превращение структуры из отдельных нитей в сеть и приобретение термореактивных свойств и улучшенных характеристик таких как: химическая стойкость и механическая прочность.

В подтверждение выше сказанного было проведено измерение адгезии частиц сшитого полиэтилена к цементной матрице с помощью прибора ПСО-МГ4 (рис.12). Об отсутствии адгезии между матрицей и традиционным полиэтиленом можно визуальное судить по рис.11а.

По результатам измерения определенное значение адгезии составило 0,98 МПа. Сравнивая полученные при измерениях данные со значениями сцепления цементной матрицы с традиционными натуральными заполнителями (табл.5) можно сделать вывод, что сцепление частиц сшитого полиэтилена и цементной матрицы сопоставимо со сцеплением цементной матрицы и полированного гранита, известняка, песчаника. Это объясняется неправильной формой частиц, неровностью, шероховатостью поверхности и разветвленной волокнистой структурой частиц дробленого сшитого полиэтилена. Также, вероятно, вклад в уплотнение контактов на границе фаз может вносить наличие в составе сшитого полиэтилена технического углерода, который приводит к структурированию матрицы, увеличению плотности упаковки зерен цементной матрицы, уплотнению контактных слоев на границе матрицы и заполнителя, что требует дополнительных исследований.



Рисунок 12 - Измерение адгезии частиц сшитого полиэтилена к цементной матрице с помощью прибора PCS-MG4: а) приклеенная отрывная пластина, б) испытание, в) место отрыва, г)оторванная пластина с частицами полиэтилена, д) измеренное значение

Таблица 5 – сравнение сцепления цементной матрицы с поверхностью заполнителя в виде отходов сшитого полиэтилена и поверхностью традиционных заполнителей бетонов

<i>Вид поверхности заполнителя</i>	<i>Показатель сцепления цементного камня с поверхностью, МПа</i>
Дробленые отходы сшитого полиэтилена (измеренное значение)	0,98
Полированная поверхность гранита, известняка, песчаника	0,6-0,9 [15,16]
Шероховатая поверхность гранита, известняка, песчаника	1-1,8 [15,16]

Выводы

Основные результаты исследований, проведенных в данной работе:

1. Неправильная форма, шероховатая и неровная поверхность частиц сшитого полиэтилена положительно влияют на механическую адгезию такого заполнителя и цементной матрицы. Помимо шероховатости поверхности влиять на сцепление сшитого полиэтилена и цементной матрицы может наличие в составе заполнителя технического углерода. Измеренное значение адгезии поверхности частиц сшитого полиэтилена к цементной матрице составило 0,98 МПа, что сопоставимо с адгезией цементной матрицы к полированной поверхности каменных заполнителей.

2. Согласно результатам исследования свойств синтезированных образцов прочность материала на основе отходов сшитого полиэтилена и кирпичного боя уменьшается с увеличением доли содержания сшитого полиэтилена, при этом уменьшается плотность образцов. Прочность образцов при этом варьируется в пределах 20-40 МПа, плотность составляет от 1750 до 1950 кг/м³.

3. При сравнении характера разрушения синтезированных образцов с традиционным бетоном и костробетоном можно сделать вывод о том, что характер разрушения образцов синтезированного материала больше схож с поведением традиционного бетона. По значению модуля упругости синтезированный композиционный материал находится между костробетоном и традиционным бетоном, приближаясь по значению модуля упругости к последнему. Снижение модуля упругости по сравнению с традиционным бетоном происходит в связи с применением более деформативного заполнителя.

4. Результаты данной работы могут быть использованы как основание для дальнейшего исследования механических характеристик композитов на неорганических вяжущих и полимерных заполнителях, а также адгезии полимерных заполнителей к цементной матрице. Образцы синтезированных материалов могут быть рекомендованы в качестве кладочного материала для внутренних и наружных работ, а также в качестве материала для изготовления элементов мощения.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, госзадание ВлГУ). Исследования проводились с использованием оборудования межрегионального многопрофильного и междисциплинарного центра коллективного пользования перспективных и конкурентоспособных технологий по направлениям развития и применения в промышленности/машиностроении отечественных достижений в области нанотехнологий (соглашение №075-03-2024-112 от 17.01.2024г.).

Acknowledgments

The research was carried out within the state assignment in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme FZUN-2024-0004, state assignment of VISU). The study was carried out using the equipment of the interregional multispecialty and interdisciplinary center for the collective usage of promising and competitive technologies in the areas of development and application in industry/mechanical engineering of domestic achievements in the field of nanotechnology (Agreement No. 075-03-2024-112 of January 17, 2024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафин Р.Г., Степанов В.В., Хайруллина Э.Р., Гайнуллина А.А., Степанова Т.О. Современные строительные композиционные материалы на основе древесных отходов. // Вестник Казанского технологического университета. 2014. С.123-128.
2. Бакатович А.А., Давыденко Н.В., Долгонож А.В. Стеновые материалы на основе соломы и костры льна с высокими теплоизоляционными свойствами. // Вестник Полоцкого государственного университета. 2016. №8. С.28-32.
3. Salim K., Houssam A., Belaid A., Brahim H. Reinforcement of building plaster by waste plastic and glass // ICSI 2019 The 3rd International Conference on Structural Integrity. 2019. pP. 170-176.
4. Сиков Н.Е., Серёгин А.И., Юркин Ю.В. Использование пластиковых отходов в качестве заполнителя в цементном растворе и приготовлении бетона. // Инженерный вестник Дона. № 8. 2022.
5. M.J. Islam, I.A. Dipta, Md. Rahat. Investigation of recycled poly-ethylene terephthalate (PET) as partial replacement of coarse aggregate in concrete // Journal of Civil Engineering (IEB). 2018. No. 46. Pp. 11-20.
6. KouS.C., LeeG., PoonC.S., Lai W.L. Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes // Waste management. 2009. No.29. Pp. 621–629.
7. Chernouti Y., Rabehi B. Strength and durability of mortar made with plastic bag waste (MPBW) // International Journal of Concrete Structures and materials. Vol.6. No.3.
8. Чалов К.В., Луговой Ю.В., Косивцов Ю.Ю., Сульман Э.М. Исследование кинетики термодеструкции сшитого полиэтилена. // Бюллетень науки и практики. 2019. Т.5. №12. С.37-46.
9. Zéhila G.-Ph., Assaad J.J. Feasibility of concrete mixtures containing cross-linked polyethylene waste materials // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 226. Pp. 1-10.

10. Яковлев Г.И., Гордина А.Ф., Саидова З.С., Бгунова Е.В. Влияние дисперсий технического углерода на свойства мелкозернистого бетона. // Строительные материалы. 2018. С. 89-92.
11. Сарайкина К.А., Голубев В.А., Яковлев Г.И., Федорова Г.Д., Александров Г.Н., Плеханова Т.А., Дулесова И.Г. Модификация базальтофибробетона нанодисперсными системами. // Строительные материалы. 2015. №10. С.64-69.
12. Frigione M. Recycling of PET Bottles as fine aggregate in concrete // *Waste Management*. 2010. No.30 Pp.1101-1106.
13. Значко-Яворский И.Л. Очерки истории вяжущих веществ от древнейших времен до середины XIX века: Монография – Москва-Ленинград: Издательство академии наук СССР, 1963. 500с.
14. Волженский А.В., Буров Ю.С., Колокольников В.С. Минеральные вяжущие вещества: Учеб. – Москва: Издательство литературы по строительству, 1966. 406 с.
15. Каримов И.Ш. Прочность сцепления цементного камня с заполнителями в бетоне и факторы влияющие на нее. // Технологии бетонов. 2013. №4. С.28-31.
16. Несветаев Г.В. Ву Л.К. Модель для оценки сцепления цементного камня с заполнителем по величине предела прочности бетона при осевом растяжении // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2017. Том 9. №3.

REFERENCES

1. Safin R.G., Stepanov V.V., Hajrullina E.R., Gajnullina A.A., Stepanova T.O. Sovremennye stroitel'nye kompozicionnye materialy na osnove drevesnyh othodov [Modern construction composite materials based on wood waste] *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014. Pp.123-128. (rus)
2. Bakatovich A.A., Davydenko N.V., Dolzhonok A.V. Stenovye materialy na osnove solomy i kostry l'na s vysokimi teploizolyacionnymi svojstvami [Flax straw-based wall materials with high thermal insulation properties] *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016. No.8. Pp.28-32. (rus)
3. Salim K., Houssam A., Belaid A., Brahim H. Reinforcement of building plaster by waste plastic and glass // *ICSI 2019 The 3rd International Conference on Structural Integrity*. 2019. Pp. 170-176.
4. Sikov N.E., Seryogin A.I., Yurkin Yu.V. Ispol'zovanie plastikovyh othodov v kachestve zapolnitelya v cementom rastvore i prigotovlenii betona [The use of plastic waste as an aggregate in cement mortar and concrete preparation] *Inzhenernyj vestnik Dona*. No. 8. 2022. (rus)
5. M.J. Islam, I.A. Dipta, Md. Rahat. Investigation of recycled poly-ethylene terephthalate (PET) as partial replacement of coarse aggregate in concrete // *Journal of Civil Engineering (IEB)*. 2018. No. 46. Pp. 11-20.
6. Kou S.C., Lee G., Poon C.S., Lai W.L. Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes // *Waste management*. 2009. No.29. Pp. 621–629.
7. Chernouti Y., Rabehi B. Strength and durability of mortar made with plastic bag waste (MPBW) // *International Journal of Concrete Structures and materials*. Vol.6. No.3.
8. Chalov K.V., Lugovoj Yu.V., Kosivcov Yu.Yu., Sul'man E.M. Issledovanie kinetiki termodestrukcii sshitogo polietilena [Investigation of the kinetics of thermal degradation of cross-linked polyethylene] *Byulleten' nauki i praktiki*. 2019. Vol.5. No.12. Pp.37-46. (rus)
9. Zéhila G.-Ph., Assaad J.J. Feasibility of concrete mixtures containing cross-linked polyethylene waste materials // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 226. Pp. 1-10.
10. Yakovlev G.I., Gordina A.F., Saidova Z.S., Bgunova E.V. Vliyanie dispersij tekhnicheskogo ugleroda na svojstva melkozernistogo betona [The effect of carbon black dispersions on the properties of fine-grained concrete] *Stroitel'nye materialy*. 2018. Pp. 89-92. (rus)
11. Sarajkina K.A., Golubev V.A., Yakovlev G.I., Fedorova G.D., Aleksandrov G.N., Plekhanova T.A., Dulesova I.G. Modifikaciya bazal'tofibrobetona nanodispersnymi sistemami [Modification of basalt fiber concrete by nanodisperse systems] *Stroitel'nye materialy*. 2015. No.10. Pp.64-69. (rus)
12. Frigione M. Recycling of PET Bottles as fine aggregate in concrete // *Waste Management*. 2010. No.30 Pp.1101-1106.
13. Znachko-Yavorskij I.L. Ocherki istorii vvyazhushchih veshchestv ot drevnejshih vremen do serediny XIX veka [Essays on the history of building binders from ancient times to the middle of the XIX century] Moscow-Leningrad. USSR. 1963. 500p. (rus)
14. Volzhenskij A.V., Burov Yu.S., Kolokol'nikov V.S. Mineral'nye vyazhushchie veshchestva [Mineral binders] Moscow. 1966. 406 p. (rus)
15. Karimov I.Sh. Prochnost' scepheniya cementnogo kamnya s zapolnitelyami v betone i faktory vliyayushchie na nee [The adhesion strength of cement stone to aggregates in concrete and the factors affecting it] *Tekhnologii betonov*. 2013. No.4. Pp.28-31. (rus)
16. Nesvetaev G.V. Vu L.K. Model' dlya ocenki scepheniya cementnogo kamnya s zapolnitelem po velichine predela prochnosti betona pri osevom rastyazhenii [A model for evaluating the adhesion of cement stone to aggregate by the value of the tensile strength of concrete under axial tension] *Internet journal «NAUKOVEDENIE»*. 2017. Vol. 9. No.3. (rus)

Информация об авторах

Баруздин Александр Андреевич

ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный Университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир, Россия,
аспирант кафедры строительного производства
E-mail: baruzdin98@bk.ru

Закревская Любовь Владимировна

ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный Университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир, Россия,
канд. техн. наук, доц., доцент кафедры строительного производства
E-mail: lvzak@mail.ru

Information about authors

Baruzdin Aleksandr A.

Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov, Vladimir, Russia,
Postgraduate student of the dep. of construction production
E-mail: baruzdin98@bk.ru

Zakrevskaya Lyubov V.

Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov, Vladimir, Russia,
candidate in tech. sc., docent, associated prof. of the dep. of construction production
E-mail: lvzak@mail.ru

И.А. ШМАРОВ¹, В.В. ЗЕМЦОВ¹¹ФГБУ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СТАЦИОНАРНОЙ СОЛНЦЕЗАЩИТЫ НА ОСВЕЩЕННОСТЬ ПОМЕЩЕНИЙ.

Аннотация. В статье рассматривается влияние горизонтальных стационарных солнцезащитных устройств на освещенность помещений с учетом их ориентации относительно сторон света и угловой высоты солнца. Измерения проводились под естественным небосводом на трансформируемой модели помещения. Изменялась глубина помещения и размеры стационарного солнцезащитного устройства. На основании полученных результатов даны рекомендации по проектированию эффективных солнцезащитных устройств в целях обеспечения наилучшего баланса между защитой от прямого солнечного излучения и достаточной естественной освещенностью. Использование результатов работы при проектировании будет способствовать улучшению микроклимата помещений, снижению тепловой нагрузки на отопление и повышению энергоэффективности.

Ключевые слова: солнцезащита, угловая высота солнца, естественная освещенность, эффективность солнцезащитных систем.

I.A. SHMAROV¹, V.V. ZEMTSOV¹

INFLUENCE OF HORIZONTAL STATIONARY SUN PROTECTION ON ROOM DAYLIGHTING

¹ Federal State Budgetary Institution Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Moscow, Russia

Annotation. The article examines the influence of horizontal stationary sun protection devices on the illumination of rooms, taking into account their orientation relative to the cardinal directions and the angular height of the sun. Measurements were carried out under the natural sky on a transformable model of the room. The depth of the room and the dimensions of the stationary sun protection device were changed. Based on the obtained results, recommendations are given for the design of effective sun protection devices in order to ensure the best balance between protection from direct solar radiation and sufficient daylighting. Using the results of the work in the design will help improve the microclimate of the premises, reduce the heat load on heating and increase energy efficiency.

Keywords: sun protection, angular height of the sun, daylighting, daylight factor, effectiveness of sun protection systems.

Введение.

Солнцезащита зданий занимает одно из главных мест в регулировании теплового комфорта и естественной освещенности помещений. Вопрос о естественном освещении зданий приобретает особую актуальность для регионов с преобладанием солнечных дней в году. Иногда весь световой проем заполняют солнцезащитными устройствами, что ограничивает связь с внешним миром и не пропускает благотворный спектр солнечной радиации, что значительно снижает освещенность и препятствует аэрации помещений. Горизонтальная стационарная солнцезащита, такая как балконы, козырьки и навесы, представляет собой один из наиболее эффективных способов контроля солнечного света, проникающего в помещение [1-4].

Влияние этих систем на освещенность помещения определяется различными факторами, включая ориентацию здания, угловую высоту солнца [5] и климатические условия зоны строительства [6]. Анализ отечественных и зарубежных исследований стационарных солнцезащитных устройств и методов их учета позволяет выявить как общие тенденции, так и специфические подходы в различных странах. Исследования акцентируют внимание на учете климатических особенностей при разработке и выборе солнцезащитных устройств. Например, для жарких климатов разрабатываются системы, максимально снижающие тепловую нагрузку, а для холодных – устройства, сохраняющие максимальную освещенность при минимальных потерях тепла [7-9].

Отечественные и зарубежные исследования имеют схожие методологические подходы. Однако, зарубежные исследования часто более фокусированы на интеграции новых технологий и материалов. Таким образом, интеграция опыта и методов как отечественных, так и зарубежных исследований может существенно улучшить качество проектирования и эффективность использования стационарных солнцезащитных устройств. Важно провести детальный анализ солнечного воздействия и условий для каждой конкретной зоны строительства, чтобы обеспечить максимальную эффективность солнцезащитных систем [10-17].

Рассмотрим влияние горизонтальной стационарной солнцезащиты на естественную освещенность помещений. Степень влияния горизонтальной стационарной солнцезащиты на освещенность помещения определяется через отношение естественной освещенности в помещении к величине освещенности на горизонтальной поверхности. Это соотношение зависит от ориентации помещения и местоположения расчетной точки. При проектировании стационарными системами солнцезащиты в определенной климатической зоне, располагая данные о средней суммарной освещенности на горизонтальной поверхности от ясного неба позволяют, применяя коэффициент затенения K_o , рационально спроектировать систему солнцезащиты с учетом требуемой естественной освещенности в помещении.

Такой подход позволяет создать эффективную и рациональную систему стационарной солнцезащиты, адаптированную к специфическим условиям зоны строительства и обеспечивающую необходимый уровень естественной освещенности внутри помещений.

Модели и методы

Проведение экспериментальных измерений под естественным небосводом на модели помещения влияния горизонтальных стационарных солнцезащитных устройств на освещенность помещений.

Экспериментальные измерения освещенности в помещениях с учетом влияния прямой и рассеянной солнечной радиации, проходящей через световой проем в зависимости от ориентации, играют важную роль при проектировании стационарных устройств солнцезащиты и определении потерь естественной освещенности. Этот процесс включал несколько ключевых этапов:

1. Проведение измерений естественной освещенности в помещении при различных условиях солнечной радиации и ориентации помещения. Это включает измерения как при прямом солнечном свете, так и при рассеянной радиации, которая возникает в облачные дни или при наличии отражающих поверхностей.

2. Понимание того, как различные конструкции стационарных солнцезащитных устройств (например, балконы, навесы, козырьки, выступающие над окном архитектурные элементы) влияют на естественную освещенность внутри помещения. Важно учитывать, что эффективность солнцезащитных устройств может значительно варьироваться в зависимости от угла падения солнечных лучей, ориентации помещения, времени суток и времени года.

3. Проведение анализа, насколько стационарные солнцезащитные устройства снижают уровень естественной освещенности в помещении. Это включает расчет потерь естественной освещенности, что позволяет оценить, обеспечивают ли устройства достаточный уровень светового комфорта в зависимости от ориентации помещения и соответствуют ли они нормативным требованиям.

4. Использование полученных данных для создания моделей освещенности в помещении с учетом различных сценариев использования солнцезащитных устройств. Это помогает предсказать, как будет меняться естественная освещенность при изменении условий освещения (например, при изменении угла падения солнечных лучей в зависимости от расчетной точки).

5. На основе проведенных измерений и расчетов можно оптимизировать конструкции солнцезащитных устройств для достижения баланса между снижением солнечной радиации и сохранением достаточной естественной освещенности. Это способствует созданию комфортных условий внутри помещения и повышению энергоэффективности здания.

В результате этих мероприятий можно проектировать эффективные стационарные устройства солнцезащиты, которые обеспечат комфортное и энергоэффективное использование помещений.

Для обеспечения точности и достоверности экспериментальных данных, размеры помещения модели помещения (сборно-разборная в масштабе 1:10) должна значительно превышать размеры фотоэлемента. Минимальный размер помещения должен быть как минимум в десять раз больше размера фотоэлемента. Это условие необходимо для предотвращения влияния краевых эффектов и обеспечения равномерного распределения света, что позволяет получать точные измерения и анализировать результаты без значительных погрешностей.

Проведены экспериментальные измерения естественной освещенности на модели помещения со средневзвешенным коэффициентом отражения внутренних поверхностей, $\rho_{ср} = 0,55$ с окном высотой 1,50 м. и шириной 2,00 м. при различной ориентации и временной отрезок в расчетных точках. В качестве объектов исследования помещения глубиной 3,00м., 4,50м., 6,00м. и шириной 3,00м. при различной ориентации по сторонам света, на освещенность которых оказывают влияние балконы вышестоящих квартир, горизонтальные выступы на фасаде здания, козырьки, навесы.

Измерения освещенности проводятся с учетом ГОСТ 24940–2016 «Здания и сооружения. Методы измерения освещенности» в части характеристик применяемого оборудования для измерения освещенности.

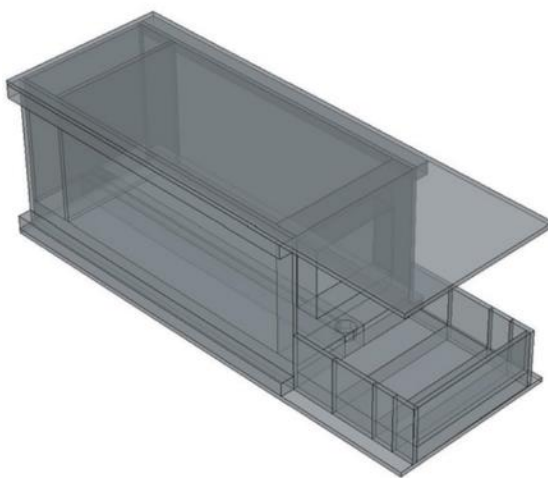


Рисунок 1 – Трансформируемая модель исследуемого помещения для варианта с балконами глубиной 3,00м

Экспериментальные исследования базировались на методе физического моделирования [18-20] в основу которого положены два основных закона строительной физики: закон проекции телесного угла и закон подобия. Закон подобия имеет большое практическое значение, позволяя при исследовании естественного освещения помещений заменять их моделями в определенном масштабе.

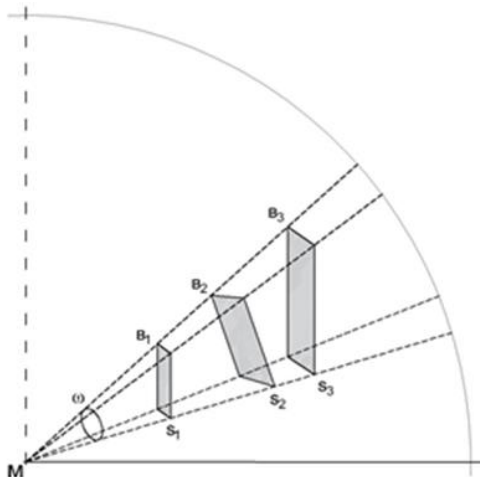


Рисунок 2 – Схема к закону проекции телесного угла

Результаты исследования и их анализ

Результаты работы представлены на рисунках 3-7. В экспериментальных измерениях определены значения горизонтальной естественной освещенности по точкам нормирования в помещении и одномоментной для каждой из точек наружной горизонтальной освещенности и рассчитан коэффициента затенения K_0 , учитывающий влияние на освещенность по трем вариантам глубины стационарной солнцезащиты, в зависимости от ориентации помещения и временного отрезка.

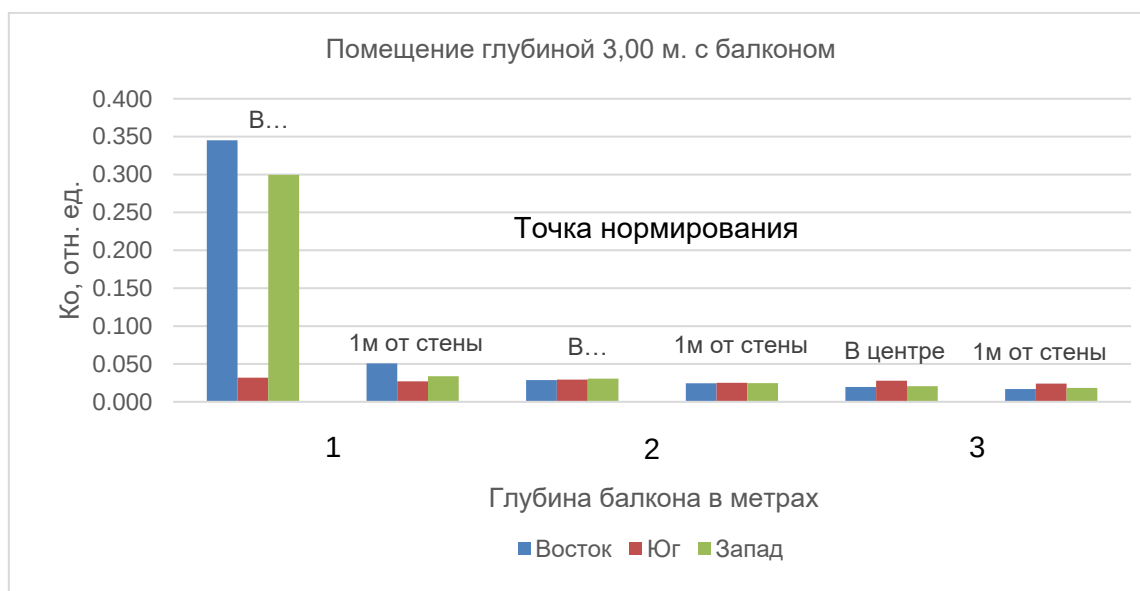


Рисунок 3 – Диаграмма значений коэффициента затенения K_0 , учитывающего влияние на освещенность в помещениях шириной 3,00 м. и глубиной 3,00 м. балконов разной глубины в зависимости от ориентации и расположения точки нормирования.

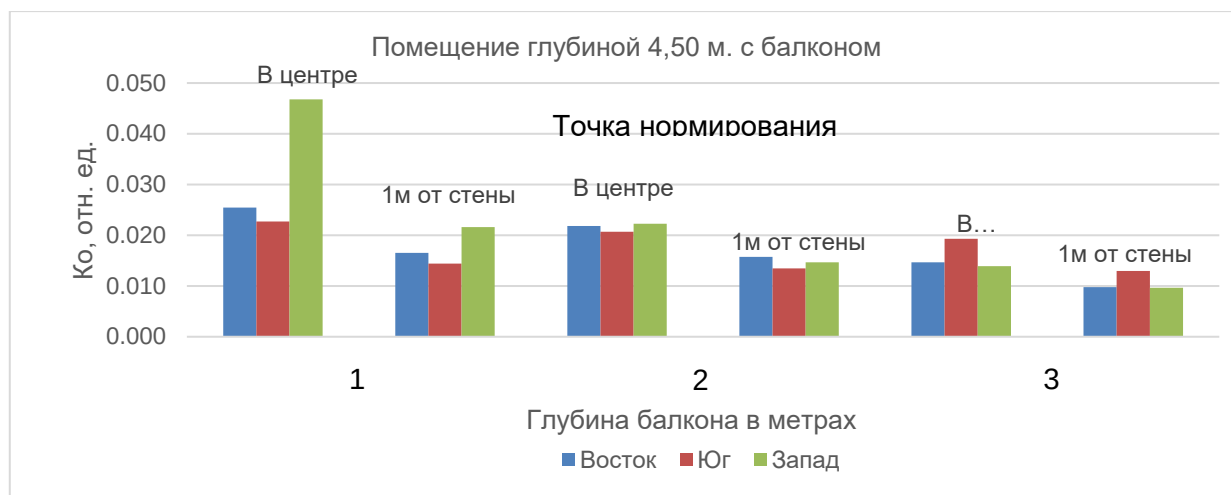


Рисунок 4 – Диаграмма значений коэффициента затенения K_o , учитывающего влияние на освещенность в помещениях шириной 3,00 м. и глубиной 4,50 м. балконов разной глубины в зависимости от ориентации и расположения точки нормирования.

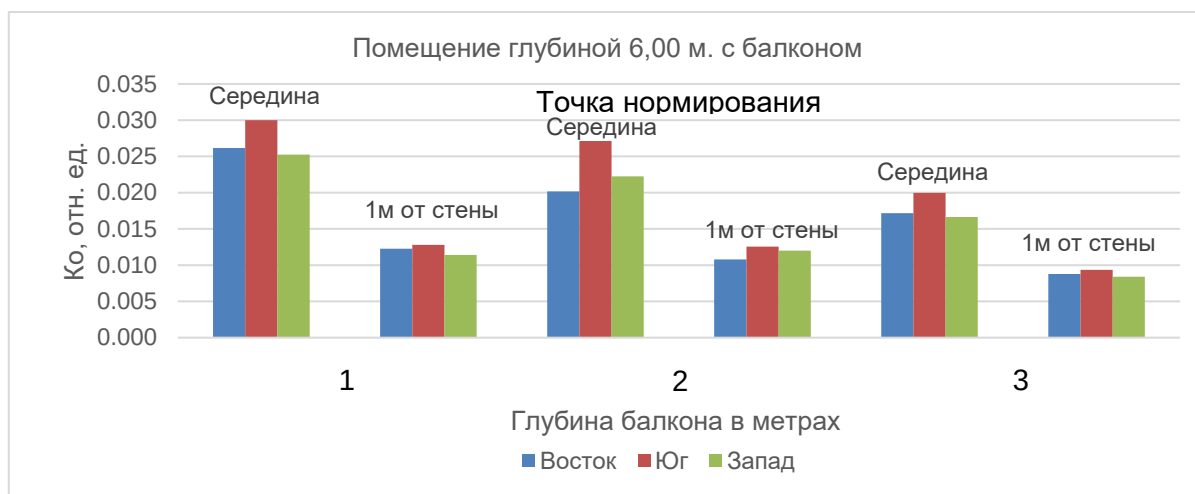


Рисунок 5 – Диаграмма значений коэффициента затенения K_o , учитывающего влияние на освещенность в помещениях шириной 3,00 м. и глубиной 6,00 м. балконов разной глубины в зависимости от ориентации и расположения точки нормирования.

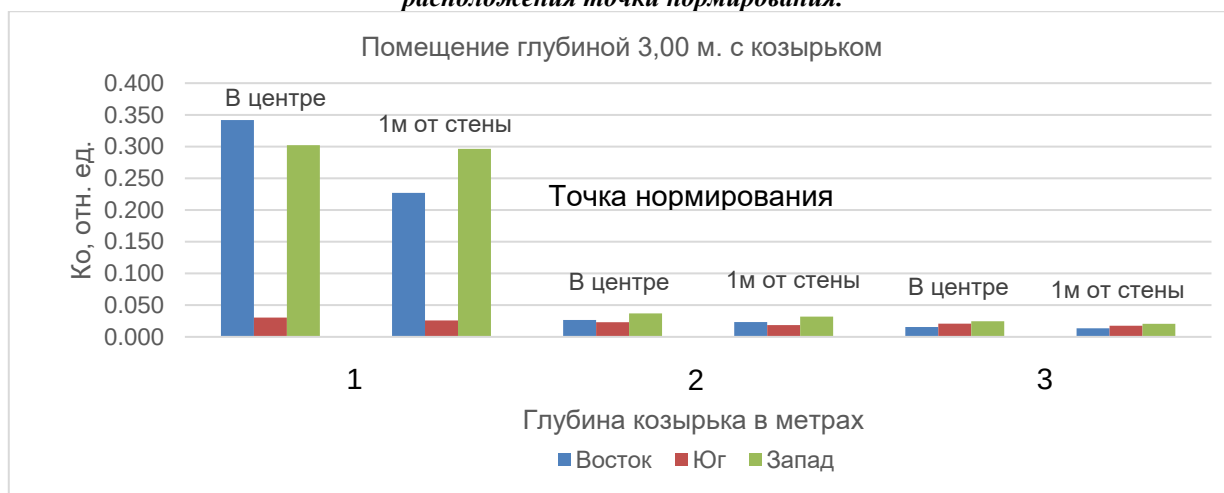


Рисунок 6 – Диаграмма значений коэффициента затенения K_o , учитывающего влияние на освещенность в помещениях шириной 3,00 м. и глубиной 3,00 м. козырьков разной глубины в зависимости от ориентации и расположения точки нормирования.

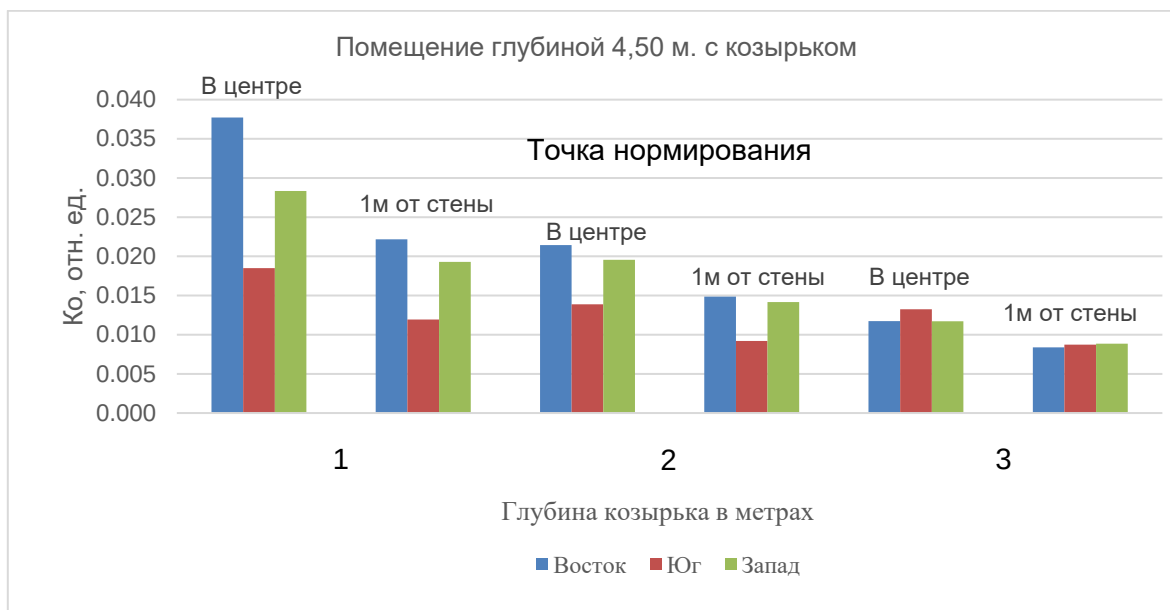


Рисунок 7 – Диаграмма значений коэффициента затенения K_o , учитывающего влияние на освещенность в помещениях шириной 3,00 м. и глубиной 4,50 м. козырьков разной глубины в зависимости от ориентации и расположения точки нормирования.

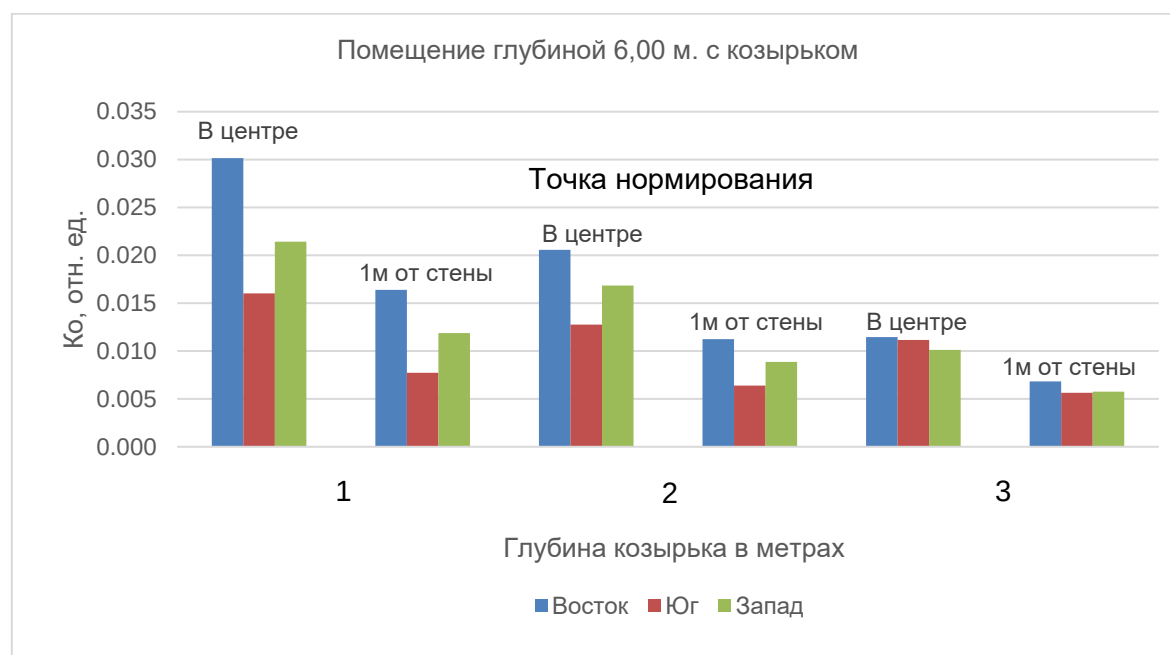


Рисунок 7 – Диаграмма значений коэффициента затенения K_o , учитывающего влияние на освещенность в помещениях шириной 3,00 м. и глубиной 6,00 м. козырьков разной глубины в зависимости от ориентации и расположения точки нормирования.

Систематизировав данные результата экспериментальных измерений по влиянию горизонтальных стационарных солнцезащитных устройств на освещенность помещений, получили таблицы 1 и 2:

Таблица 1 – Значения коэффициента K_o , учитывающего влияние на освещенность в помещениях шириной 3,00 м. с балконом в зависимости от ориентации

Глубина помещения, м	Точка нормирования в помещении	Ориентация помещения	Значения <i>Ко</i> для помещения шириной 3,00м. с балконом глубиной, м.		
			1,00	2,00	3,00
3,00	В центре	Восток	0,34	0,03	0,02
		Юг	0,03	0,03	0,03
		Запад	0,30	0,03	0,02
	1 м от стены	Восток	0,05	0,02	0,02
		Юг	0,03	0,03	0,02
		Запад	0,04	0,03	0,02
4,50	В центре	Восток	0,03	0,02	0,02
		Юг	0,02	0,02	0,02
		Запад	0,04	0,02	0,01
	1 м от стены	Восток	0,02	0,02	0,01
		Юг	0,01	0,01	0,01
		Запад	0,02	0,02	0,01
	6,00	В центре	Восток	0,03	0,02
Юг			0,03	0,03	0,02
Запад			0,03	0,02	0,02
1 м от стены		Восток	0,01	0,01	0,01
		Юг	0,01	0,01	0,01
		Запад	0,01	0,01	0,01
Примечание – Значение коэффициента <i>Ко</i> для помещений с другой глубиной следует принимать по интерполяции и экстраполяции.					

Таблица 2 – Значения коэффициента K_o , учитывающего влияние на освещенность на горизонтальную поверхность в помещениях шириной 3,00 м. с козырьком в зависимости от ориентации

Глубина помещения, м	Точка нормирования в помещении	Ориентация помещения	Значения <i>Ко</i> для помещения шириной 3,00м. с козырьком глубиной, м.		
			1,00	2,00	3,00
3,00	В центре	Восток	0,34	0,03	0,02
		Юг	0,03	0,02	0,02
		Запад	0,30	0,04	0,03
	1 м от стены	Восток	0,23	0,02	0,01
		Юг	0,03	0,02	0,02
		Запад	0,30	0,03	0,02
4,50	В центре	Восток	0,04	0,02	0,01
		Юг	0,02	0,01	0,01
		Запад	0,03	0,02	0,01
	1 м от стены	Восток	0,02	0,02	0,01
		Юг	0,01	0,01	0,01
		Запад	0,02	0,01	0,01
6,00	В центре	Восток	0,03	0,02	0,01
		Юг	0,02	0,01	0,01
		Запад	0,02	0,02	0,01
	1 м от стены	Восток	0,02	0,01	0,01
		Юг	0,01	0,01	0,01
		Запад	0,01	0,01	0,01
Примечание – Значение коэффициента <i>Ко</i> для помещений с другой глубиной следует принимать по интерполяции и экстраполяции.					

Анализ результатов экспериментальных измерений на модели под естественным небосводом, позволил выявить определенные закономерности и систематизировать их.

1. Значений экспериментальных измерений при ясном небе приняты средние значения внутренней и наружной освещенностей, полученные по трем измерениям для каждого варианта помещений, определена степень влияния горизонтальной стационарной солнцезащиты на освещенность помещения определяется через отношение уровня освещенности внутри помещения к величине прямой освещенности на горизонтальной поверхности. Это соотношение зависит от ориентации помещения и местоположения расчетной точки. При проектировании помещений со стационарными системами

солнцезащиты в определенной климатической зоне, знание минимального значения прямой освещенности на горизонтальной поверхности в течение дня позволяет, применяя коэффициент затенения K_o , рационально спроектировать систему солнцезащиты с учетом требуемого уровня освещенности внутри помещения (таблицы 1 и 2).

2. Исследования показали, что при различных вариантах глубины помещения (3,00 м, 4,50 м, 6,00 м) и глубины горизонтальных солнцезащитных устройств (1,00 м, 2,00 м, 3,00 м) значение коэффициента K_o увеличивается в зависимости от высоты солнца при ориентации помещения в утренний и вечерний отрезки времени. Это увеличение коэффициента K_o наблюдается при уменьшении как глубины помещения, так и глубины стационарных солнцезащитных устройств.

Выводы

Произведение средней суммарной освещенности на горизонтальной поверхности от ясного неба в зоне строительства и коэффициента затенения K_o позволяет еще при проектировании помещения с горизонтальными стационарными системами солнцезащиты определить освещенность помещения в точке нормирования. Для оптимального проектирования стационарных солнцезащитных систем необходимо учитывать эти параметры, чтобы обеспечить баланс между естественной освещенностью и защитой от прямого солнечного света в зависимости от времени суток и ориентации помещения.

При правильном выборе при проектировании размеров горизонтальных солнцезащитных устройств и глубины помещения можно существенно улучшить освещенность помещений, снижая интенсивность прямых солнечных лучей, но сохраняя достаточный уровень естественного освещения. Для достижения наилучших результатов необходимо учитывать местные климатические и географические условия, а также особенности ориентации здания при проектировании и установке стационарных солнцезащитных устройств.

Экспериментальные измерения светопропускания различных стационарных солнцезащитных устройств в реальных условиях помогают оценить потери прямой освещенности в помещениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дворецкий А.Т., Моргунова М.А., Сергейчук О.В., Спиридонов А.В. Методы проектирования стационарных солнцезащитных устройств // Светотехника. – 2016. – № 6. – С. 43–47.
2. Архитектурная физика: свет, тепло, звук / Под ред. Н.В. Оболенского. — М.: Архитектура-С, 2007. — 368 с.
3. Соловьёв А.К., Дорожкина Е.А. Современное понимание роли естественного освещения при проектировании зданий // Жилищное строительство. 2021. №11. С. 46-52. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-11-46-52>
4. Энциклопедия строительных технологий. Современные решения в области солнцезащиты зданий. — М.: Технополис, 2020. — 256 с.
5. Оболенский Н.В. Архитектура и солнце. М. : Стройиздат, 1988.
6. Киреев Н.Н. Повышение эффективности систем естественного освещения зданий на основе более полного учета ресурсов светового климата//Сб.тр. НИИСФ: Совершенствование световой среды помещений. -М., 1986. – с. 7-13.
7. Соловьёв А.К., Сунь Ифэн. Влияния характеристик светопроема на энергопотребление офисного здания в климатической зоне с жарким летом и холодной зимой в Китае // Вестник МГСУ. 2012. № 9. с. 31–38.
8. Коркина Е.В., Шмаров И.А., Войтович Е.В. Исследования времени наступления критической освещённости для оценки длительности дневного естественного освещения // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 6. с. 35-42. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-6-35-42.
9. Дарула С. Обзор современного состояния и перспектив стандартизации в области естественного внутреннего освещения. // Светотехника, 2019, №1, с.6-20.
10. СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение». – (с изменениями №1 и №2) – www.consultantplus

11. СП 367.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования естественного и совмещенного освещения» (с изменениями №1 и №2) – www.consultantplus
12. ЕН 13037:2018. «Естественное освещение» EN 13037:2018 «Daylighting». – 56 p.
13. ДИН 5034-1: 2011 «Естественное освещение помещений. Часть 1. Общие требования.» (DIN 5034-1: 2011 Tageslicht in Innenräumen. Teil 1: Allgemeine Anforderungen). – Berlin, Deutsches Institut für Normung e.V., 2011 – 19 s.
14. ДИН 5034-2: 1985 «Естественное освещение помещений./Часть 2. Основные положения.» (DIN 5034-2: 1985 Tageslicht in Innenräumen. Grundlagen)/ – Berlin, Deutsches Institut für Normung e.V., 1985 – 13 s.
15. БС 8206-2:2008 «Освещение зданий» – Часть 2. Строительные нормы и правила естественного освещения. (BS 8206-2:2008. Lighting for buildings. Part 2) – London, BSI, 2008.
16. Государственный стандарт Китайской Народной Республики GB/T 50033-2001 Стандарт проектирования естественного освещения зданий. (中华人民共和国国家标准建筑采光设计标准, GB/T 50033—2001 Standard for daylighting design of buildings).
17. ДБН В.2.5-28-2006. Державні Будівельні норми України. Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення. - Київ Мінбуд України, 2006. – 76 с.
18. Штофф В.А. Моделирование и философия. М.-Л. Изд-во Наука, 1966 - 304с.
19. Чудинский Р.М. Натурный и модельный эксперимент в учебном познании / Ю.А. Воронин, Р.М. Чудинский // Наука и школа. – 2002. – №3. – С. 33-41.
20. Гусев Н. М. Основы строительной физики: Учебник для ВУЗов. –М. :Стройиздат, 1975. – 440 с.

REFERENCES

1. Dvoretzky A.T., Morgunova M.A., Sergeychuk O.V., Spiridonov A.V. Methods of designing stationary sun protection devices // Lighting engineering.- 2016.– No. 6. – pp. 43-47.
2. Architectural physics: light, heat, sound / Edited by N.V. Obolensky. — M.: Architecture-C, 2007. — 368 p.
3. Solovyov A.K., Dorozhkina E.A. Modern understanding of the role of natural lighting in the design of buildings // Housing construction. 2021. No.11. pp. 46-52. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-11-46-52>
4. Encyclopedia of construction technologies. Modern solutions in the field of solar protection of buildings. — M.: Technopolis, 2020. — 256 p.
5. Obolensky N.V. Architecture and the sun. M. : Stroyizdat, 1988.
6. Kireev N.N. Improving the efficiency of natural lighting systems of buildings based on a more complete accounting of the resources of the lighting climate//Sat.tr. NIISF: Improving the light environment of the premises. -M., 1986. – pp. 7-13.
7. Solovyov A.K., Sun Yifeng. The influence of the characteristics of the light barrier on the energy consumption of an office building in a climatic zone with hot summers and cold winters in China // Bulletin of the MGSU. 2012. No. 9. pp. 31-38.
8. Korkina E.V., Shmarov I.A., Voitovich E.V. Studies of the time of onset of critical illumination to assess the duration of daytime natural illumination // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2022. No. 6. pp. 35-42. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-6-35-42.
9. Darula S. Review of the current state and prospects of standardization in the field of natural indoor lighting. // Svtotekhnika, 2019, No.1, pp.6-20.
10. SP 52.13330.2016 "Natural and artificial lighting". – (with changes No. 1 and No. 2) – www.consultantplus
11. SP 367.1325800.2017 "Residential and public buildings. Rules for the design of natural and combined lighting" (with amendments No. 1 and No. 2) – www.consultantplus
12. EN 13037:2018. "Natural lighting" EN 13037:2018 "Daylighting". – 56 p.
13. DIN 5034-1: 2011 "Natural lighting of premises. Part 1. General requirements." (DIN 5034-1: 2011 Tageslicht in Innenräumen. Teil 1: Allgemeine Anforderungen). – Berlin, Deutsches Institut für Normung e.V., 2011 – 19 s.
14. DIN 5034-2: 1985 "Natural lighting of premises./Part 2. Basic provisions." (DIN 5034-2: 1985 Tageslicht in Innenräumen. Grundlagen)/ – Berlin, Deutsches Institut für Normung e.V., 1985 – 13 s.
15. BS 8206-2:2008 "Lighting of buildings" – Part 2. Building codes and rules of natural lighting. (BS 8206-2:2008. Lighting for buildings. Part 2) – London, BSI, 2008.
16. State Standard of the People's Republic of China GB/T 50033-2001 Standard for the design of natural lighting of buildings. (中华人民共和国国家标准建筑采光设计标准, GB/T 50033—2001 Standard for daylighting design of buildings).

17. DBN V.2.5-28-2006. The powers that be are the norms of Ukraine. The engineer owns budinkiv i sporud. The nature of the first piece of illumination. Kiev Ministry of Culture of Ukraine, 2006. – 76 p.
18. Shtoff V.A. Modeling and philosophy. M.-L. Nauka Publishing House, 1966 - 304s.
19. Chudinsky R.M. Natural and model experiment in educational cognition / Yu.A. Voronin, R.M. Chudinsky // Science and school. - 2002. – No.3. – pp. 33-41.
20. Gusev N. M. Fundamentals of building physics: Textbook for universities. –M. :Stroyizdat, 1975. – 440 p.

Информация об авторах

Шмаров Игорь Александрович

ФГБУ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, Россия, г. Москва, Локомотивный проезд, 21), канд. техн. наук, рук. лаб. «Строительная светотехника», E-mail: shmarovigor@yandex.ru

Земцов Владимир Викторович

ФГБУ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (127238, Россия, г. Москва, Локомотивный проезд, 21), вед. инженер лаб. «Строительная светотехника», E-mail: zemcov-v@yandex.ru

Information about the authors

Shmarov Igor A.

Federal State Budgetary Institution Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (127238, Russia, Moscow, Locomotive passage, 21), Candidate of Technical Sciences, ruk. lab. "Construction lighting engineering", E-mail: shmarovigor@yandex.ru

Zemtsov Vladimir V.

Federal State Budgetary Institution Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (127238, Russia, Moscow, Locomotive passage, 21), Vedomosti. lab engineer. "Construction lighting engineering", E-mail: zemcov-v@yandex.ru

И.Л. ШУБИН¹, А.С. СТРОНГИН¹, М.А. РАЗАКОВ¹¹Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, Москва, Российская Федерация

СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫМИ СИСТЕМАМИ ДЛЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Аннотация. В работе представлен обзор используемых интеллектуальных систем в различных инженерных системах зданий, которые на данный момент активно разрабатываются инженерами в различных странах. Приведены данные истории развития и применения рассматриваемых систем для различных отраслей народного хозяйства. Описаны результаты практического применения и возникшие особенности эксплуатации устройств управления в различных инженерных системах обеспечения микроклимата (отопления, вентиляция, кондиционирования воздуха). Подробно выделены варианты регулирования систем жизнеобеспечения здания с помощью современных контроллеров, а также варианты их интеграции в совместную единую систему. Определены предполагаемые ключевые точки развития систем нейроуправления инженерным оборудованием в зданиях и сооружениях. Описаны возможные варианты внедрения нейроконтроллеров в здание (в т.ч. и многоступенчатое внедрение нейроконтроллера одной системы в глобальную систему-нейроконтроллер с несколькими инженерными системами). Результаты исследования представляют интерес для совершенствования систем управления инженерным оборудованием зданий и сооружений различного назначения с использованием элементов искусственного интеллекта.

Ключевые слова: инженерные системы, автоматические системы управления, искусственный интеллект, нейроуправление, нейроконтроллер.

I.L. SHUBIN¹, A.S. STRONGIN¹, M.A. RAZAKOV¹¹Building Physics Institute, Moscow, Russian Federation

MODERN RESEARCH OF INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS USE FOR BUILDING AND STRUCTURES ENGINEERING SYSTEMS

Abstract. There is an overview of the intelligent systems use in different engineering systems of buildings which are designing in different countries. It has been presented the history of considered systems development and application for different sectors on national economy. Authors have described the results of practical application and control devices operation features in different engineering systems for providing microclimate (heating, ventilation and air conditioning). It has been detailed highlighted the options for regulating the building life support systems with modern controllers and integration them to joint unified system. Authors have determined the proposed key points of neural control systems development for engineering equipment in building and structures. Researchers have described possible options for introducing neurocontrollers to a building (including multi-stage introduction of single system neurocontroller to a global system neurocontroller with several engineering systems). The results of the research will be interested for the services operating engineering equipment of buildings and structures for different purposes. Also this information could be used by the planning services and developing companies which use modern automated control systems for engineering systems.

Keywords: engineering systems, automatic control systems, artificial intelligence, neurocontrol, neurocontroller.

Введение

Любые технологии промышленного производства имеют несколько уровней технологических процессов, в результате которых получается конечное изделие. Из-за усложнения конструкции изделий для их создания используются процессы, которые могут быть многоступенчатыми и противоположными по физическим явлениям. Поэтому на каждом этапе производства возрастает роль системы управления каждого элемента.

Современные интеллектуальные системы управления сегодня используют новые алгоритмы, программные пакеты, нейросетевые технологии, которые объединяют в себе несколько этапов технологического процесса: регулирование; анализ; моделирование и т.п. Цель всех этапов – выполнение определенных заданных алгоритмов (исходных данных), которые может назначить оператор, наладчик системы или непосредственно элемент программы, назначенный в виде анализатора. Некоторые технологии в своем составе не имеют элементов – анализаторов и как следствие являются технологиям более низких порядков, чем системы с уже предусмотренными модулями данного назначения.

Целью настоящей работы является исследование развития интеллектуальных и нейросетевых технологий от первичных элементов (цифровых двойников, математических моделей режимов работы оборудования и т.п.) до современных самоанализирующих и самообучающихся комплексов с помощью актуальных публикаций зарубежных и отечественных авторов, входящих в региональные и мировые реферативные базы данных (РИНЦ; Scopus; Web of Science).

Исходные направления исследований интеллектуальных и нейросетевых технологий

В самом начале использования интеллектуальных технологий их применение ограничивалось лишь обработкой больших массивов данных. В последующем данные системы с помощью новых данных обработки были интегрированы в нейросети и являлись её основным ядром. Первоначальным направлением применения нейросетевых технологий являлось исследование большого количества текстовых данных. В дальнейшем тексты усложнялись не количественными характеристиками (количество символов и слов), а качественными данными. Появились иностранные слова, которые не типичны для основного текста [1]. Примером может служить медицинская терминология на латинском языке, которая имеет не кириллические символы и способы построения слов. После данного этапа появилась возможность создания улучшенных алгоритмов для систем перевода с различных языков на требуемые в данной конкретной ситуации. Причем скорость и точность перевода значительно увеличилась [2]. Одновременно с текстовой работой велась и разработка систем распознавания изображений, которая также на основе исследований последних 10 – 15 лет снизила погрешность до 1 %. Также в последние 5 лет появились нейросетевые системы, которые выполняют как функции распознавания текста и генерации этих данных в изображения. Широкое распространение они на данный момент получили в индустрии развлечений и образовании. Основная цель этих разработок на данный момент это улучшение восприятия объектов, явлений и т.п. при их текстовом описании.

В банковской сфере данные технологии используют для проведения анализа большого количества операций. Аналогично анализ производится и на фондовых рынках для выявления определённых интересующих данных. Основная функция нейросетевых технологий, используемые в финансовом секторе экономики, это анализ определенных запросов в большом объеме данных (Big Data). Запросы могут быть связаны с определением числа операция, использующих конкретные финансовые инструменты или поиск определенной суммы денежных средств, переведённых из одной финансовой организации в другую. Цель этих поисков задает оператор и в основном эта информация необходима для аналитических отделов. Другим не маловажным способом использования нейросетевых технологий является анализ существующих трендов для отделов инновационного развития предприятий, которая в

перспективе может помочь организациям, использующим данные технологии, повысить прибыли компании [3].

Техническая сфера применения интеллектуальных технологий

В настоящее время активно развивается применение интеллектуальных технологий в топливно-энергетической отрасли. Их использование не ограничивается лишь 1 участником модели «Выработка энергии – Абонент», а используется на всех этапах. Охват систем достаточно широк и за пределами этой модели т.к. он включает в себя и этап добычи полезных ископаемых – основного топлива для генерации электрической или тепловой энергии [4].

В последнее время в результате внедрения интеллектуальных технологий в энергетике распространение в основном получили цифровые двойники – электронные модели элементов энергосистемы (генераторы, электродвигатели, турбинные установки и т.п.). Поэтому большое количество публикаций в данном направлении посвящено именно их созданию и попытке их интеграции в общую энергетическую систему (модель «Генерация-Абонент») [5].

В энергетике основной целью применения интеллектуальных технологий является оптимизация работы оборудования (исключение дополнительных потерь, влияющих в конечном итоге на коэффициент полезного действия), снижение дополнительных потерь энергии [6-11], а также прогнозирование стоимости энергии на основании изменения климатических характеристик [11]. Для системы дизель-генератора с использованием интеллектуальных технологий основными инструментами регулирования являются частотный преобразователь и сервопривод топливоподачи на которые поступает команда с блока экономичного режима, где производится расчет наиболее целесообразных режимов работы.

В работе Костылева А. В. представлена иной вариант создания системы – без дополнительных датчиков контроля. В данной работе приведена лишь математическая модель и 1 элемент регулирования. Система не является обучаемой, но способна задавать характеристики согласно модели и по исходным данным оператора. В связи с тем, что данная математическая модель является достаточно неполной из-за отсутствия датчиков контроля и некоторых параметров, в ней применяются элементы теории математического моделирования, которые производят замену недостающих факторов. К такого рода заменам также можно отнести теории нечетких множеств и логики, которые приведены в ряде других работ [7].

Из-за планового внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в централизованные системы генерации в отечественной энергосистеме передачи электрической энергии возникла проблема с надежностью системы [12]. Для решения данной проблемы использовалось несколько подходов: полное или частичное прекращение генерации энергии, установка комплексов хранения энергии, перенаправление энергии в другие области с её недостатком (в т.ч. и продажа в другие страны), использование энергии в системе освещения автодорог в дневное время (т.е. сброс энергии за счет его перерасхода). С целью прогнозирования работы системы с помощью существующего оборудования и при внедрении на определенных участках установок с ВИЭ были созданы нейросетевые программные комплексы, которые отслеживают возможности применения, приведенных выше, методов работы региональных систем [13,14].

Цифровые двойники имеют как полную детализацию всех происходящих процессов, так и частично неизвестную. В связи с тем, что достаточно сложно производить сопряжение цифровых двойников всех без исключения элементов энергетической системы, на текущем этапе внедрения интеллектуальных технологий возникла потребность замены некоторых характеристик на осреднённые значения [7,8]. Но это в свою очередь порождает снижение надежности и точности некоторых моделей в комплексе. Поэтому существует еще один подход, который не связан с полной детализацией цифровой модели – использование

существующих систем АСУ для определения фактических характеристик интересующих элементов системы [9], которые напрямую не зависят от показателей модели.

Использование цифровых двойников у абонента (здания) энергетической системы также возможно, но оно не является единственным, как и в случае с централизованными энергетическими системами. Интеллектуальные технологии в данном элементе системы имеют и некоторое обособленное и независимое направление развития. Ввиду того, что некоторые инженерные системы могут быть относительно независимыми, то возможно управление и анализ энергопотребляющих систем с помощью измерительного и регулирующего оборудования, расположенного непосредственно в здании [15,16].

Применение интеллектуальных технологий в строительной отрасли

В строительной отрасли использование интеллектуальных систем в первую очередь было связано с расчетом рисков и анализа проектной документации. Так как в них не присутствуют абсолютно все элементы нейросетевых технологий. Например, при определении инфраструктурных экологических рисков происходило сравнение определенных статических проектных величин, которые не изменяются в течении времени т.е. динамика изменения экологических показателей в течении времени в них никак не учитывалась [17]. При использовании интеллектуальных технологий для проектной документации их применение ограничилось лишь сравнением проектных решений с нормативными показателями, которые базировались на основных нормативно-правовых документах (Своды Правил; ГОСТ; СанПин и т.п.) [18]. Например, при сравнении проектных ветровых нагрузок производилось сравнение принятых проектных значений различных коэффициентов запаса, которые использовались в расчетах и данных из СП 20.13330.2012 «Нагрузки и воздействия». В дальнейшем данная практика распространилась и на проектные решения для всего жизненного цикла здания, которая дополнительно учитывала изменения и создание новых нормативных документов [19].

Неотъемлемой частью строительной отрасли являются инженерные системы зданий и сооружений. В некоторых из них сегодня применяется частичное нейруправление, а именно использование существующих показателей фактического напора в напорном трубопроводе из системы водоснабжения или водоотведения для определения режима работы основных перекачивающих насосов [20].

В работе О.И. Кисельчука и ряда других авторов приводится система нейруправления насосными установками [21]. Целевым назначением использования нейроконтроллера является оптимизация работы элементов насосного оборудования с максимальной эффективностью при различных количествах работающих агрегатов и их скорости. Принципиальная схема разработанной системы приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Структурная схема нейруправления насосными агрегатами

В системе водоснабжения также как и в электрических сетях в связи с определенными изменениями в гидравлических режимах (из-за увеличения количества различных типов абонентов) происходят аварии, т.е. снижается надежность системы. И на данный момент инженерами решается аналогичная проблема с возможностью повышения надежности системы за счет использования цифровых двойников трубопроводов системы водоснабжения [20,21].

В работе И.А. Архарова обобщены все существующие виды регулирования работы различных элементов оборудования с помощью интеллектуальных систем [22], которые могут быть применены для всех видов промышленности. В работе приведены принципиальные схемы регуляторов, которые работают по принципам отклонения и возмущения, а также схемы регулирования при использовании нечеткой логики. Некоторые виды данных систем были представлены в работах, связанных с оборудованием на энергетических сетях генерации [5-8]. В исследовании рассмотрены структурные схемы регулирования с элементами нейронных технологий. Первый вариант системы потенциально может работать только с данными из одной системы с некоторой задержкой их получения. Второй вариант более динамичен и за счет оптимизации распределения показателей и определения веса каждого показателя в общей (глобальной системе) может обрабатывать больший объем информации.

Одним из наиболее сложных комплексов, где сегодня внедряются нейросетевые технологии, являются инженерные системы обеспечения микроклимата. В данном направлении большее распространение получили не цифровые двойники энергетических систем зданий, а использование данных из систем автоматизированного управления (АСУ) [23]. В основном это связано, с большим распространением автоматизации систем теплоснабжения и вентиляции как в децентрализованных, так и в централизованных системах. Дополнительной причиной большего распространения использования данных с АСУ является факт того, что цифровые модели инженерных систем достаточно сложно конструируемы и их появления было намного позже, чем систем АСУ. Поэтому использование данных с оборудования АСУ в данных инженерных системах имеет приоритетное значение.

Использование нейро-технологий в здании на базе существующего измерительного оборудования систем автоматизированного управления позволит достаточно точно проводить мероприятия по сбережению энергетических ресурсов и повысить эффективность существующего инженерного оборудования. В ряде практических результатов непосредственного применения всех типов нейросетевых технологий в системах отопления и вентиляции удалось добиться сокращения расхода тепловой энергии на 38 % и более 50 % [24,25]. В системах кондиционирования воздуха данная тенденция также прослеживается, но из-за наличия большего числа оборудования (холодильные машины, компрессоры и т.п.) и необходимости в большем числе операций-регулирования и времени на их проведение данный эффект может быть ниже [26-28].

В работе А. Krūmiņš достаточно подробно описан вариант интегрирования погодозависимых нейроконтроллеров с функцией предрегулирования в существующую систему АСУ. Энергосберегающий эффект значителен и за период исследования достигает 38%, что указывает на успешное применение, разработанной системы. Основными элементами данной системы являются – нейроконтроллер и программный комплекс, разработанный в среде Matlab Simulink (MS). Стоит отметить, что сред MS достаточно популярный инструмент в энергетике, который используется для сопряжения всего оборудования и создания математических алгоритмов целеполагания. Нейроконтроллер имеет несколько режимов записи – от оборудования регулирования и контроля систем автоматики, данных будущей погоды (посредством подачи запроса в базу данных предполагаемой погоды через некоторое время), данных из собственных отдельно подсоединенных датчиков контроля. Все эти данные могут быть направлены на исходные установочные данные непосредственно в систему АСУ.

Параллельно производится расчет и контроль параметров, а также их оптимизация (осреднение и т.п.) и преобразование в некоторую единую функциональную зависимость. Также в системе в реальном времени мониторятся и проверяются существующие параметры и их отклонения с моментальным регулированием. После установления параметров нейроконтроллер сохраняет показания всех параметров системы (положения регуляторов расхода, режим работы насосного оборудования и т.п.) и происходит дальнейший мониторинг системы. На рисунке 2 представлена блок-схема разработанной системы [24].



Рисунок 2 – Принципиальная схема интегрированной системы нейруправления в существующую систему автоматизации

Режим преднастройки включает в себя погодозависимую часть, которая может настроить инженерную систему с АСУ таким образом, чтобы она соответствовала режиму работы оборудования при целевой температуре воздуха через некоторое время с учетом инерционности системы, которая была определена в период самообучения. Данный режим может быть создан и с помощью других видов программных комплексов [28].

Аппаратная часть системы состоит из двух элементов: контроллера системы АСУ (ESP-8266 на базе Arduino) с присоединенными к ней датчиками температуры, расхода и т.п. и микроЭВМ (Raspberry Pi 3). К устройствам возможно подключение других видов датчиков и как следствие задание иных исходных данных с возможностью получения отличных от исходных зависимостей [29]. Передача данных из контроллера АСУ в микроЭВМ производится с помощью протоколов HTTP. МикроЭВМ может быть подсоединено к удаленной облачной подсистеме среды Matlab, где производится оптимизация работы оборудования, расчет положений оборудования и т.п.

В работе Б. Су дополнительно применялась система с цифровым двойником, а их результаты исследования базируются не только на фактически установленных системах АСУ с корректировкой данных, но и на комплексной теоретической модели [25]. Тем не менее, в их работе дополнительно приводится влияние времени отклика системы на энергопотребление в результате команды регулирования от нейросетевых контроллеров и их теоретических расчетов. Ввиду того, что передача сигнала происходит через радиочастотные каналы, а также производится параллельный непосредственный расчет математической модели, происходит некоторая задержка выполнения действий и как следствие более поздний отклик системы на команду. Влияние этих явлений на энергопотребление составляет от 0,2% до 43,92%. Проблему с запаздыванием сигналов присутствует и на датчиках без радиочастотной передачи данных. Моделированию данных типов устройств посвящено достаточно много работ т.к.

данная проблема присутствовала уже с прошлого века. При их расчетах (при процессе моделирования) возможно применение регулярного теплового режима Г.М. Кондратьева.

Относительно новым направлением в использовании нейроконтроллеров является их использование в диагностике инженерных систем [30,31]. Их основное назначение выявление неисправностей в работе систем. Основным принципом действия – является условие, что система при определенных исходных данных должна работать согласно расчетной модели с некоторым допустимым отклонением. При ненадлежащей работоспособности системы показатели не могут поддерживаться в течение некоторого отведенного промежутка время (заданного оператором) при определенных исходных данных. Данный принцип заложен в систему для определения вероятностных проблем.

Использование нейроконтроллеров для 1 инженерной системы можно охарактеризовать как локальную систему. Она охватывает лишь определенную инженерную систему. При использовании совокупности инженерных систем (отопления, вентиляция, освещение и т.п.) данную систему, состоящую из более чем 1 инженерной системы, можно охарактеризовать как глобальную систему [32]. Соединение нескольких систем может производиться как с помощью нейроконтроллеров каждой системы, так и с помощью единого контроллера, который будет охватывать несколько инженерных систем. При использовании нескольких контроллеров отклик системы будет значительно выше из-за меньшего использования вычислительных ресурсов и меньшего количества регулируемого оборудования, а при наличии одного контроллера на несколько систем будет значительно увеличено время регулирования системы. При этом возможна некоторая оптимизация вычислительных возможностей т.к. некоторые показатели будут относительно идентичными.

Анализ результатов исследования

Основной задачей на данном этапе развития нейросетевых технологий в системах обеспечения микроклимата является определение вариантов внедрения устройств в инженерные системы. Их внедрение возможно как на локальном уровне в рамках одной системы (минимум: без больших массивов обрабатываемых данных для не более чем 1 диктующего показателя регулирования) так и на глобальном уровне в рамках нескольких инженерных систем здания и с обработкой большого количества данных в т.ч. с более чем 1-им диктующим показателем (самый возможный максимум). Предполагаются два направления внедрения: локальный и глобальный. Варианты локального внедрения нейросетевого управления для здания можно разделить 2 типа: 1 инженерная система – 1 диктующий показатель микроклимата и 1 инженерная система – более 1 диктующего показателя микроклимата.

Варианты глобального внедрения нейросетевого управления для здания также можно разделить 2 типа: более 1 инженерной системы – не более 1 диктующего показателя микроклимата и более 1 инженерной системы – более 1 диктующего показателя микроклимата.

Не менее важным будет и определение режимов работы нейроконтроллера, которые требуются в зависимости от технологических факторов. Рекомендуемый период исследования процессов в здании – 1 год т.к. за этот промежуток времени система проведет анализ всех периодов года и их возможные варианты регулирования. Эти режимы можно выделить следующим образом: анализ текущих показателей при запуске существующего оборудования; анализ наиболее благоприятного (эффективного или энергосберегающего) места регулирования. Данный режим необходим при установке нейроконтроллеров в связке с котельным и насосным оборудованием, в которых возможно качественное и количественное регулирование; режим анализа данных; наикратчайшее время для регулирования системы;

наиболее энергосберегающий вариант регулирования системы при существующих заданных параметрах поддержания параметров; наиболее энергоэффективные промежуточные режим работы с переменным количеством оборудования. Данных режимов возможно много из-за технологических особенностей зданий. Например, в производственном секторе возможны посменные работы, где максимальное количество смен – 2. При отработке в 1 смене до 8 часов. Он является наиболее сложным и требующим анализа с позиции полученных данных; наиболее энергоэффективный режим работы с максимальным количеством оборудования; аварийный режим работы, соответствующий проектному режиму (он может быть использован в виде исходного режима).

Выводы

1. Нейросетевые и интеллектуальные технологии в настоящее время применяются в различных отраслях народного хозяйства с целью повышения безопасности и эффективности технологических процессов.
2. Нейроуправление инженерными системами зданий и сооружений представляет собой сложную многокомпонентную структуру, включающую внешние и внутренние данные (климатические характеристики и поддерживаемые параметры внутренней среды), анализирующие программные комплексы и регулирующие средства управления.
3. Одним из ключевых элементов нейросетевых технологий является анализирующий и регулирующий аппарат (нейроконтроллер), объединяющий информационные и технологические системы.
4. Интеллектуальные технологии управления инженерными системами зданий и сооружений являются важным инструментом повышения энергоэкономичности и надёжности эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ирхин И. А., Булатов В. Г., Воронцов К. В. Аддитивная регуляризация тематических моделей с быстрой векторизацией текста // Компьютерные исследования и моделирование. 2020. Т. 12, № 6. С. 1515-1528. doi:10.20537/2076-7633-2020-12-6-1515-1528.
2. Ирхин И. А., Воронцов К. В. Сходимость алгоритма аддитивной регуляризации тематических моделей // Труды института математики и механики УрО РАН. 2020. Т. 26, № 3. С. 56-68. doi:10.21538/0134-4889-2020-26-3-56-68.
3. Герасименко Н. А., Чернявский А. С., Никифорова М. А., Никитин М.Д., Воронцов К.В. Инкрементальное обучение тематических моделей для поиска трендовых тем в научных публикациях // Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления. 2022. Т. 508, № 1. С. 106-108. doi:10.31857/S2686954322070086.
4. Филиппов В. В. Анализ научно-технических работ по автоматическому управлению теплоэнергетических установок // Современные достижения научно-технического прогресса. 2023. № 3(8). С. 9-11. doi:10.18411/sdntp-05-2023-02.
5. Фролов В. Я., Жилиготов Р. И. Разработка системы бездатчикового векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами в Matlab Simulink // Записки горного института. 2018. Т. 229. – С. 92-97.
6. Муртазин Т. Э., Шевченко А. А., Титов В. Г. Система векторного управления автономным электроприводом // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2023. Т. 26. № 4. С. 449-456. doi:10.21443/1560-9278-2023-26-4-449-456.
7. Костылев А. В., Есаулкова Д. В., Казаков Е. Г. Применение нейроуправления в асинхронном электроприводе со скалярным управлением // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. 2014. № 1. С. 207-217.
8. Burneyster M. V., Bulatov R. V., Berdyshev I. I. Development of a Method for Optimizing the Voltage Mode Based on Fuzzy Logic // IEEE. С. 9782944. doi:10.1109/Inforino53888.2022.9782944.
9. Wu Z., Gao Z., Li D., Chen Y., Liu Y. On transitioning from PID to ADRC in thermal power plants // Control Theory and Technology. 2021. Т. 19. С. 3-18.
10. Бродач М.М., Шилкин Н.В. Нейронные сети: оптимальное управление отпуском тепловой энергии // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2019. №8. С. 52-57.

11. Блинова К. А., Курналеева А. А., Бурмейстер М. В., Булатов Р. В. Рыночный механизм управления режимами работы генерирующего оборудования электростанций // XXXIII Международная научно-практическая конференция «EUROPEAN RESEARCH»: сборник трудов. Пенза: Наука и Просвещение, 2021. С. 74-78.
12. Веренцов Л. А., Бурмейстер М. В., Стаценко Д. В., Маленкова Е. А. Оценка эквивалентной инерции в ЭЭС со значительной долей ВИЭ // Наука и бизнес: пути развития. 2023. № 10(148). С. 11-14.
13. Samoilov A. A., Sergeeva, M. M., Burmeyster, M. V., Kislova, E. A., Zaliznyi, S. A. Intelligent engineering of electric energy storage systems in the Russian Federation: Fundamentals // IEEE. 2021. С. 1-5.
14. Болдырев В.В., Горькавый М.А. Разработка интеллектуального модуля управления автоматизированной автономной системой энергообеспечения // Учен. зап. КнАГТУ. 2021. № 3. С. 9-18.
15. Das H. P., Lin Y. W., Agwan U., Spangher L., Devonport A., Yang Y., Drgona J., Chong A., Schiavon S., Spanos C. J. Machine Learning for Smart and Energy-Efficient Buildings // Environmental Data Science. 2024. Т. 3. С. e1. doi:10.1017/eds.2023.43
16. Alanne K., Sierla S. An overview of machine learning applications for smart buildings // Sustainable Cities and Society. 2022. Т. 76. С. 103445.
17. Burkov V., Titarenko B. Economic mechanisms for environmental risk management // E3S Web of Conferences. 2019. Т. 91. С. 08009.
18. Галкина Е. В. Анализ инструментов верификации проектной документации // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 6. С. 95-97. doi:10.24153/2079-5920-2018-8-6-95-97.
19. Galkina E., Kuzina O. Building information model verification at the lifecycle stage of construction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Т. 365 (5). С. 062031. doi:10.1088/1757-899X/365/6/062031.
20. Burian S. O., Kiselychnyk O., Pushkar M. V., Reshetnik V. S., Zemlianukhina H. Y. Energy-efficient control of pump units based on neural-network parameter observer // Technical Electrodynamics. 2020. № 1. С. 71-77. doi:10.15407/techned2020.01.071.
21. Gromov G. N., Primin O. G. Use of genetic algorithms for calibration of hydraulic models of water supply systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Т. 456. С. 012108. doi:10.1088/1757-899X/456/1/012108.
22. Мамедов В. М., Архаров И. А. Перспективы методов регулирования в инженерных системах // Холодильная техника. 2022. № 4. С. 213-220. doi:10.17816/RF321953.
23. Абдуллин В. В., Шнайдер Д. А., Курзанов С. Ю., Яворовский Ю. В. Использование технологии "интернета вещей" в отоплении зданий: упреждающее управление, распределённый мониторинг, интеллектуальная балансировка // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2018. № 8(200). С. 54-58.
24. Krūmiņš, A., Bogdanovs, N., Beļinskis, R., Mežale, K., Garjāns, M. Increasing Buildings Automation Systems Efficiency with Real-Time Simulation Trough Improved Machine Self-learning Algorithms // Springer Proceedings in Energy. 2019. С. 41-49. doi:10.1007/978-3-030-00662-4_4
25. Su B., Wang S., Li W. Impacts of uncertain information delays on distributed real-time optimal controls for building HVAC systems deployed on IoT-enabled field control networks // Applied Energy. 2021. Т. 300. С. 117383.
26. Şahin A. Ş. Performance analysis of single-stage refrigeration system with internal heat exchanger using neural network and neuro-fuzzy // Renewable energy. 2011. №. 10 (36). С. 2747-2752.
27. Pérez-Gomariz M., López-Gómez A., Cerdán-Cartagena F. Artificial neural networks as artificial intelligence technique for energy saving in refrigeration systems — A review // Clean Technologies. 2023. № 1 (5). С. 116-136.
28. Zhang Y., Zhou Z., Liu J., Yuan J. Data augmentation for improving heating load prediction of heating substation based on TimeGAN // Energy. 2022. Т. 260. С. 124919.
29. Li C., Cui C., Li M. A proactive 2-stage indoor CO2-based demand-controlled ventilation method considering control performance and energy efficiency // Applied Energy. 2023. Т. 329. С. 120288.
30. Zhao Y., Li T., Zhang X., Zhang C. Artificial intelligence-based fault detection and diagnosis methods for building energy systems: Advantages, challenges and the future // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Т. 109. С. 85-101.
31. Taheri S., Ahmadi A., Mohammadi-Ivatloo B., Asadi S. Fault detection diagnostic for HVAC systems via deep learning algorithms // Energy and Buildings. 2021. Т. 250. С. 111275.
32. Yang S., Wan M. P., Ng B. F., Dubey S., Henze G. P., Chen W., Baskaran K. Model predictive control for integrated control of air-conditioning and mechanical ventilation, lighting and shading systems // Applied Energy. 2021. №12 (300). С. 117325.

REFERENCES

1. Irkhin I.A., Bulatov V.G., Vorontsov K.V. Additive regularization of topic models with fast text vectorization. *Computer Research and Modeling*. 2020. Vol. 12. No. 6. Pp. 1515-1528. (rus).
2. Irkhin I.A., Vorontsov K.V. Convergence of the algorithm of additive regularization of topic models. *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics (Suppl.)*. 2021. Vol. 315. Suppl. 1. Pp. S128–S139. (rus).

3. Gerasimenko N. A., Chernyavsky A. S., Nikiforova M. A., Nikitin M. D., Vorontsov K. V. Inkremental'noye obucheniye tematicheskikh modeley dlya poiska trendovykh tem v nauchnykh publikatsiyakh [Incremental training of topic models for searching for trending topics in scientific publications]. *Doklady Rossijskoj Akademii Nauk. Matematika, Informatika, Processy Upravleniya*. 2022. vol. 508, no. 1. pp. 106-108. doi:10.31857/s2686954322070086. (rus).
4. Filippov V. V. Analiz nauchno-tehnicheskikh rabot po avtomaticheskomu upravleniyu teploenergeticheskikh ustanovok [Analysis of scientific and technical works on automatic control of thermal power plants]. *Sovremennyye dostizheniya nauchno-tehnicheskogo progressa*. 2023. Vol. 8. No. 3. Pp. 9-11. doi:10.18411/sdntp-05-2023-02. (rus).
5. Frolov V.Y., Zhiligitov R.I. Development of sensorless vector control system for permanent magnet synchronous motor in Matlab Simulink. *Journal of Mining Institute*. 2018. Vol. 229. p. 92. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.92. (rus).
6. Murtazin T. E., Shevchenko A. A., Titov V. G. Sistema vektornogo upravleniya avtonomnym elektroprivodom [Vector control system for an autonomous electric drive]. *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2023. Vol. 26. No. 4. Pp. 449-456. doi:10.21443/1560-9278-2023-26-4-449-456. (rus).
7. Kostylev A. V., Esaukova D. V., Kazakov E. G. Primeneniye neyroupravleniya v asinkhronnom elektroprivode so skalyarnym upravleniyem [Application of neural control in an asynchronous electric drive with scalar control]. *Energetika. Innovatsionnyye napravleniya v energetike. calstekhnologii v energetike*. 2014. No. 1. Pp. 207-217. (rus).
8. Burmeyster M. V., Bulatov R. V., Berdyshev I. I. Development of a Method for Optimizing the Voltage Mode Based on Fuzzy Logic. *IEEE*. Pp. 9782944. doi:10.1109/Inforino53888.2022.9782944.
9. Wu Z., Gao Z., Li D., Chen Y., Liu Y. On transitioning from PID to ADRC in thermal power plants. *Control Theory and Technology*. 2021. Vol. 19. Pp. 3-18.
10. Brodach M.M., Shilkin N.V. Neyronnyye seti: optimal'noye upravleniye otpuskom teplovoy energii [Neural networks: optimal control of thermal energy supply]. AVOK: Ventilyatsiya, Otopleniye, Konditsionirovaniye Vozdukh, Teplosnabzheniye i Stroitel'naya Teplofizika. 2019. no. 8. pp. 52-57. (rus).
11. Blinova K. A., Kurnaleyeva A. A., Burmeyster M. V., Bulatov R. V. Rynochnyy mekhanizm upravleniya rezhimami raboty generiruyushchego oborudovaniya elektrostantsiy [Market mechanism for managing the operating modes of generating equipment of power plants]. XXXIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «EUROPEAN RESEARCH» [Proceedings of XXXIII International Scientific and Practical Conference «EUROPEAN RESEARCH»]. Penza: Nauka i Prosveshcheniye, 2021. Pp. 74-78. (rus).
12. Verentsov L. A., Burmeister M. V., Statsenko D. V., Malenkova E. A. Otsenka ekvivalentnoy inertsii v ees so znachitel'noy doley vie [Assessment of equivalent inertia in an eps with a significant share of renewable energy sources]. *Nauka i biznes: puti razvitiya*. 2023. Vol. 148. No. 10. Pp. 11-14. (rus).
13. Samoilov A. A., Sergeeva, M. M., Burmeyster, M. V., Kislova, E. A., Zaliznyi, S. A. Intelligent engineering of electric energy storage systems in the Russian Federation: Fundamentals // *IEEE*. 2021. Pp. 1-5.
14. Boldyrev V.V., Gorkavy M.A. Razrabotka intellektual'nogo modulya upravleniya avtomatizirovannoy avtonomnoy sistemoy energoobespecheniya [Development of an intelligent control module for an automated autonomous power supply system]. *Uchen. zap. KnaGTU*. 2021. No. 3. Pp. 9-18. (rus).
15. Das H. P., Lin Y. W., Agwan U., Spangher L., Devonport A., Yang Y., Drgona J., Chong A., Schiavon S., Spanos C. J. Machine Learning for Smart and Energy-Efficient Buildings. *Environmental Data Science*. 2024. Vol. 3. Pp. e1. doi:10.1017/eds.2023.43
16. Alanne K., Sierla S. An overview of machine learning applications for smart buildings. *Sustainable Cities and Society*. 2022. Vol. 76. Pp. 103445.
17. Burkov V., Titarenko B. Economic mechanisms for environmental risk management. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 91. Pp. 08009.
18. Galkina E.V. Analiz instrumentov verifikatsii proyektnoy dokumentatsii [Analysis of design documentation verification tools]. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2018. No. 6. Pp. 95-97. doi:10.24153/2079-5920-2018-8-6-95-97. (rus).
19. Galkina E., Kuzina O. Building information model verification at the lifecycle stage of construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 365. No. 5. Pp. 062031. doi:10.1088/1757-899X/365/6/062031.
20. Burian S. O., Kiselychnyk O., Pushkar M. V., Reshetnik V. S., Zemlianukhina H. Y. Energy-efficient control of pump units based on neural-network parameter observer. *Technical Electrodynamics*. 2020. No. 1. Pp. 71-77. doi:10.15407/technd2020.01.071.
21. Gromov G. N., Primin O. G. Use of genetic algorithms for calibration of hydraulic models of water supply systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 456. Pp. 012108. doi:10.1088/1757-899X/456/1/012108.
22. Vladislav M.M., Arkharov I.A. Prospects for control methods in engineering systems. *Refrigeration Technology*. 2022. Vol. 111. No. 4. Pp. 213–220. doi:10.17816/RF321953. (rus).
23. Abdullin V.V., Shnayder D.A., Kurzanov S. Yu., Yavorovsky Yu. V. IoT technology applications to building heating: predictive control, distributed monitoring, smart hydraulic balancing. Plumbing, Heating, Air-conditioning. 2018. Vol. 200. No. 8. Pp. 54-58. (rus).

24. Krūmiņš, A., Bogdanovs, N., Beļinskis, R., Mežale, K., Garjāns, M. Increasing Buildings Automation Systems Efficiency with Real-Time Simulation Through Improved Machine Self-learning Algorithms. *Springer Proceedings in Energy*. 2019. Pp. 41-49. doi:10.1007/978-3-030-00662-4_4
25. Su B., Wang S., Li W. Impacts of uncertain information delays on distributed real-time optimal controls for building HVAC systems deployed on IoT-enabled field control networks. *Applied Energy*. 2021. Vol. 300. Pp. 117383.
26. Şahin A. Ş. Performance analysis of single-stage refrigeration system with internal heat exchanger using neural network and neuro-fuzzy. *Renewable energy*. 2011. Vol. 36. No. 10. Pp. 2747-2752.
27. Pérez-Gomariz M., López-Gómez A., Cerdán-Cartagena F. Artificial neural networks as artificial intelligence technique for energy saving in refrigeration systems — A review. *Clean Technologies*. 2023. Vol. 5. No. 1. Pp. 116-136.
28. Zhang Y., Zhou Z., Liu J., Yuan J. Data augmentation for improving heating load prediction of heating substation based on TimeGAN. *Energy*. 2022. Vol. 260. Pp. 124919.
29. Li C., Cui C., Li M. A proactive 2-stage indoor CO₂-based demand-controlled ventilation method considering control performance and energy efficiency. *Applied Energy*. 2023. Vol. 329. Pp. 120288.
30. Zhao Y., Li T., Zhang X., Zhang C. Artificial intelligence-based fault detection and diagnosis methods for building energy systems: Advantages, challenges and the future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 109. Pp. 85-101.
31. Taheri S., Ahmadi A., Mohammadi-Ivatloo B., Asadi S. Fault detection diagnostic for HVAC systems via deep learning algorithms. *Energy and Buildings*. 2021. Vol. 250. Pp. 111275.
32. Yang S., Wan M. P., Ng B. F., Dubey S., Henze G. P., Chen W., Baskaran K. Model predictive control for integrated control of air-conditioning and mechanical ventilation, lighting and shading systems. *Applied Energy*. 2021. Vol. 300. No. 12. Pp. 117325.

Информация об авторах

Шубин Игорь Любимович

ФГБУ «Научно-Исследовательский Институт Строительной Физики РААСН», г. Москва, Россия, д-р техн. наук, член-корр. РААСН, директор института, E-mail: niisf@niisf.ru

Стронгин Андрей Семенович

ФГБУ «Научно-Исследовательский Институт Строительной Физики РААСН», г. Москва, Россия, канд. техн. наук, с.н.с., заведующий лабораторией «Экологическая безопасность и энергоэффективность инженерного оборудования зданий», E-mail: strongin@yandex.ru

Разаков Мухаммет Азатович

ФГБУ «Научно-Исследовательский Институт Строительной Физики РААСН», г. Москва, Россия, инженер лаборатории «Экологическая безопасность и энергоэффективность инженерного оборудования зданий», E-mail: muhammet@nlm.ru

Information about authors

Shubin Igor L.

Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia, doctor in tech. sc., corr. member of RAACS, director, E-mail: niisf@niisf.ru

Strongin Andrew S.

Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia, candidate in tech. sc., senior researcher, head of laboratory «Environmental safety and energy efficiency of buildings engineering equipment», E-mail: strongin@yandex.ru

Razakov Muhammet A.

Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia, engineer of laboratory «Environmental safety and energy efficiency of buildings engineering equipment», E-mail: muhammet@nlm.ru

Уважаемые авторы!
Просим Вас ознакомиться с основными требованиями
к оформлению научных статей

- Представляемый материал должен быть **оригинальным, не опубликованным ранее** в других печатных изданиях.
- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется числом знаков с учетом пробелов. Рекомендуемый объем статей: **от 15000 до 45000 знаков с пробелами**.
- Статья должна быть набрана на листах формата А4 шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и вверху – 2 см; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья предоставляется в электронном виде по электронной почте или через систему электронной редакции.
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.
- Если статья возвращается автору на доработку, исправленный вариант следует прислать в редакцию повторно, приложив письмо с ответами на замечания рецензента. Доработанный вариант статьи рецензируется и рассматривается редакционной коллегией вновь. Датой представления материала считается дата поступления в редакцию окончательного варианта исправленной статьи.
- Аннотации всех публикуемых материалов, ключевые слова, информация об авторах, списки литературы будут находиться в свободном доступе на сайте соответствующего журнала и на сайте Российской научной электронной библиотеки – РУНЭБ (Российский индекс научного цитирования).

В тексте статьи не рекомендуется применять:

- обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
- для одного и того же понятия различные научные термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
- произвольные словообразования;
- сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.

Обязательные элементы:

- **заглавие (на русском и английском языке)** публикуемого материала должно быть точным и емким, слова, входящие в заглавие, должны быть ясными сами по себе, а не только в контексте; следует избегать сложных синтаксических конструкций, новых словообразований и терминов, а также слов узкопрофессионального и местного значения;
- **аннотация (на русском и английском языке)** кратко описывает объект исследования, мотивацию к проведению исследования, результаты исследования (рекомендуется указывать конкретные результаты и зависимости, полученные в исследовании), выводы (кратко); рекомендуемый объем – от 200 до 250 слов;
- **ключевые слова (на русском и английском языке)** – это текстовые метки, по которым можно найти статью при поиске и определить предметную область текста; обычно их выбирают из текста публикуемого материала, достаточно 5-10 ключевых слов.
- **список литературы**, на которую автор ссылается в тексте статьи; рекомендуемый объем списка литературы – не менее 20 источников.

В информации об авторах рекомендуется указывать ORCID, Scopus ID и SPIN-код, присвоенный в РИНЦ.

Редакция не взимает плату с авторов за подготовку, рецензирование и размещение в открытом доступе статей.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

Адрес издателя:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302026, Орловская область, г. Орел, ул. Комсомольская д. 95
+7 (4862) 75-13-18

www.oreluniver.ru
E-mail: info@oreluniver.ru

Адрес редакции

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302030, Орловская область, г. Орел, ул. Московская, 77.
+79065704999

<http://oreluniver.ru/science/journal/sir>
E-mail: str_and_rek@mail.ru

Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор М.А. Амелина
Компьютерная верстка М.А. Амелина

Подписано в печать
Дата выхода в свет
Формат 70×108/16. Печ. л. 14,6
Цена свободная. Тираж 500 экз.
Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета
на полиграфической базе ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95.