

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)

Скобелева 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)

Емельянов С.Г., чл.-корр. РААСН, д-р техн.

наук, 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)

Лефай З., д-р техн. наук, проф. (Франция)

Мелькумов В.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия)

Орлович Р.Б., д-р техн. наук, проф. (Польша)

Птичникова Г.А., д-р арх., проф. (Россия)

Реболж Д., д-р техн. наук, проф. (Словения)

Римшин В.И., чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук,
проф. (Россия)

Сергейчук О.В., д-р техн. наук, проф. (Украина)

Серпик И.Н., 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)

Чернышов Е.М., акад. 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:

Юрова О.В., (Россия)

Адрес редакции:

302030, Россия, г. Орел, ул. Московская, 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»

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2021

Содержание

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

- Бедов А.И., Николенко И.И.** Обеспечение эксплуатационных характеристик железобетонных элементов каркасов зданий, подвергшихся сейсмическим воздействиям..... 3
- Демин П.Д.** Оценка вероятности разрушения железобетонной балки лежащей на стохастическом упругом основании с двумя коэффициентами податливости, по наклонному сечению от поперечной силы..... 16
- Радайкин О.В., Сабитов Л.С., Ахтямова Л.Ш., Аракчеев Т.П.** Общий случай расчёта стержневых элементов из армированного бетона диаграммным методом..... 26
- Свентиков А.А., Кузнецов Д.Н.** Автоматизированное проектирование пространственных решетчатых стальных конструкций покрытий сложной формы..... 38
- Ступишин Л.Ю., Масалов А.В., Савельева Е.В.** Методика испытаний композитного армирующего стержня на основе базальтовой комплексной нити..... 50
- Травуш В.И., Федоров В.С., Маковецкий О.А.** Моделирование поведения сплошного вертикального структурного геотехнического массива - разделительного экрана..... 65

Безопасность зданий и сооружений

- Ильющенко Т.А., Колчунов В.И., Федоров С.С.** Трещиностойкость преднапряженных железобетонных рамно-стержневых конструкций при особых воздействиях..... 74
- Уткин Д.Г.** Прочность изгибаемых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры..... 85

Строительные материалы и технологии

- Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С.** Использование в производстве жаростойких бетонов алюмосодержащего нанотехногенного сырья и отходов углеобогащения..... 96
- Волкова Н.Г., Цешковская Е.Ю.** О факторах, формирующих режим влажности зданий..... 106
- Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш.** Исследование свойств многокомпонентных наполненных вяжущих систем щелочной активации..... 114
- Селяев В.П., Селяев П.В., Грязнов С.Ю., Бабушкина Д.Р.** Верификация зависимостей, аппроксимирующих диаграммы деформирования бетонов цементного и полимерного методом нормируемых показателей..... 125

В порядке обсуждения

- Степаненко А.А.** Сравнительный анализ системы UP DOWN при реализации градостроительных проектов Москвы: российский опыт..... 134

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)
Skobeleva 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)
Emelyanov S.G., doc. sc. tech., 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)
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)
Sergeychuk O.V., doc. sc. tech., prof. (Ukraine)
Serpik I.N., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Tamrazyan A.G., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Travush V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Treschev 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)
Chernyshov E.M., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Schach R., doc. sc. tech., prof. (Germany)
Iakovenko I.A., doc. sc. tech., prof. (Ukraine)

Managing Editor:
Yurova O.V. (Russia)

The edition address:
302030, Orel, Moskovskaya Street, 77
+7 (4862) 73-43-49
<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 г.

Index on the catalogue of the «**Pressa Rossi**» 86294

© Orel State University, 2021

Contents

Theory of engineering structures. Building units

- Bedov A.I., Nikolenko I.I.** Provision of operational characteristics of Reinforced concrete elements of frames of buildings subjected to seismic effects..... 3
- Deminov P.D.** Estimation of the failure probability of a reinforced concrete beam lying on a stochastic elastic base with two pressure coefficients, on an inclined section from the lateral force..... 16
- Radaykin O.V., Sabitov L.S., Akhtyamova L.SH., Arakcheev T.P.** General case of reinforced concrete rod elements calculation using the diagram method..... 26
- Sventikov A.A., Kuznetsov D.N.** Computer-aided design of spatial lattice steel structures for coatings of complex shape..... 38
- Stupishin L.U., Masalov A.V., Saveleva E.V.** Test method for a composite reinforcing rod on the base of basalt complex thread..... 50
- Travush V.I., Fedorov V.S., Makovetskiy O.A.** Modeling the behavior of a continuous vertical structural geotechnical solid - a dividing screen..... 65

Building and structure safety

- Iliushchenko T.A., Kolchunov V.I., Fedorov S.S.** Crack resistance of prestressed reinforced concrete frame structure systems under special impact..... 74
- Utkin D.G.** Strength of bent reinforced concrete elements with zone reinforcement made of steel fiber..... 85

Construction materials and technologies

- Abdrakhimov B.Z., Abdrakhimova E.S.** Use of aluminum-containing nanotechnogenic raw materials and carbon waste in the production of heat-resistant concrete..... 96
- Volkova N.G., Tseshkovskaya E.Y.** Concerning the factors forming the humidity mode of buildings..... 106
- Murtazaev S-A. YU., Salamanova M. SH.** Research of properties of multi-component filled alkaline activation knitting systems..... 114
- Selyaev V.P., Selyaev P.V., Gryaznov S.YU., Babushkina D.R.** Verification of dependences approximating the diagrams of deformation of cement and polymer concrete by the method of normalized indicators..... 125

By way of discussion

- Stepanenko A.A.** Restructuring in residential areas and transformation of the urban space of the metropolis..... 134

The journal Building and Reconstruction (Stroitel'stvo i rekonstruktsiya) have being included by Higher Attestation Commission in the List of peer-reviewed scientific journals, in which the main scientific results of dissertations for the degree of candidate and doctor of science should be published, for the group of scientific specialties 05.23.00 - Construction and architecture: 05.23.01 - Building constructions, buildings and structures (technical sciences), 05.23.02 - Soils and foundations, underground structures (technical sciences), 05.23.03 - Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting (technical sciences), 05.23.05 - Building products and construction materials (technical sciences), 05.23.08 - Construction technology and organization (technical sciences), 05.23.17 - Structural mechanics (technical sciences), 05.23.19 - Environmental safety in construction and urban economy, 05.23.21 - Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity (architecture), 05.23.22 - Urban planning, planning of rural settlements (architecture). The journal is indexed in RSCI, RSCI on the Web of Science.

А.И. БЕДОВ¹, И.И. НИКОЛЕНКО^{1,2}

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

^{1,2}ООО «Восток-Техника», г. Москва, Россия

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КАРКАСОВ ЗДАНИЙ, ПОДВЕРГШИХСЯ СЕЙСМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

***Аннотация.** Целями исследования являлись вопросы повышения эксплуатационных характеристик зданий с несущим железобетонным каркасом, расположенных в сейсмических районах РФ. В статье приведены результаты анализа ранее выполненных исследований напряженно-деформированного состояния элементов каркаса многоэтажного здания при сейсмических воздействиях. Установлено, что несмотря на более оптимальное решение несущих систем зданий в виде железобетонных каркасов в сейсмических районах в результате периодических воздействий фоновых землетрясений, неизбежного накопления временной усталости и повреждения конструкций в процессе эксплуатации, происходит значительное снижение динамической сопротивляемости здания в целом. Отмечается, что на протяжении всего срока «жизни» объекта, кроме расчетной сейсмической нагрузки, решающую роль также играет и физический износ, развитие которого ведет к структурным модификациям свойств материалов и неизбежной деформации технических характеристик несущих конструкций. Установлено, что наиболее опасные разрушения, связанные со снижением прочности колонн, узлов сопряжения несущих элементов и, как следствие, потерей их устойчивости, приводящей к прогрессирующему разрушению здания в целом. Рассмотрены три группы возможных методов усиления и повышения сейсмостойкости зданий и сооружений.*

***Ключевые слова:** железобетонные каркасные здания, сейсмические воздействия, динамическая сопротивляемость зданий, физический износ, усиление элементов каркаса.*

A.I. BEDOV¹, I.I. NIKOLENKO^{1,2}

¹Federal state budget educational institution of higher education “MOSCOW STATE UNIVERSITY OF CIVIL
ENGINEERING (NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY)”, Moscow, Russia

^{1,2}LLC “Vostok-Tekhnika”, Moscow, Russia

PROVISION OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS OF FRAMES OF BUILDINGS SUBJECTED TO SEISMIC EFFECTS

***Abstract.** The objectives of the study were to improve the operational characteristics of buildings with a bearing reinforced concrete framework located in seismic areas of the Russian Federation. The article presents the results of analysis of previous studies of stress-strain state of the framework elements of a multi-storey building under seismic impacts. It has been established that despite a more optimal solution of load-bearing systems of buildings in the form of reinforced concrete frames in seismic areas as a result of periodic actions of background earthquakes, inevitable accumulation of temporary fatigue and damage to structures during operation there is a significant reduction of dynamic resistance of the building as a whole. It is noted, that throughout all term of life of an object except design seismic load, the crucial role is played also by physical wear which development leads to structural modifications of properties of materials and inevitable deformation of technical characteristics of bearing structures. It has been found, that the most dangerous failures*

associated with the reduction of strength of columns, assemblies, the mating of bearing elements and, as a result, the loss of their stability, leading to the progressive destruction of the building as a whole. Three groups of possible methods of strengthening and increasing seismic resistance of buildings and structures are considered.

Keywords: *reinforced concrete frame buildings, seismic impacts, dynamic resistance of buildings physical wear, reinforcement of frame elements.*

Введение

Землетрясения являются серьезной проблемой мирового масштаба. Согласно данным международной статистики и оценкам крупной страховой компании «Munich Re», количество опасных сейсмических воздействий за последнее время возросло в 3 раза, а ущерб от них – более чем в шесть раз.

Тревожная тенденция опасного проявления сейсмической активности выявлена и на территории Российской Федерации. В соответствии с данными обновленных карт ОСР, четко прослеживается распространение угрозы 9-балльных землетрясений на значительной части территории Северного Кавказа, где до недавнего времени строительство осуществлялось из условия расчетной сейсмичности 7-8 баллов.

По данным целевой программы «Сейсмобезопасность территории РФ» еще в 2002 году количество проживающих в зданиях с дефицитом сейсмостойкости в 2-3 балла составляло более 10 млн. человек.

Железобетонные каркасные здания всегда занимали высокие позиции в рейтинге сейсмостойкого строительства. Однако, в результате периодических воздействий фоновых землетрясений, неизбежного накопления временной усталости и повреждения конструкций в процессе эксплуатации, происходит значительное снижение динамической сопротивляемости зданий в целом. Деградация физических и конструктивных характеристик несущих конструкций проявляется в снижении адгезии бетона и арматуры, что приводит к появлению новых, зачастую значительных трещин. Кроме этого, снижение жесткости изгибаемых элементов в результате периодического воздействия землетрясений «умеренного» характера может быть критичным и достигать 30-40%.

В связи с отмеченным, оценка последствий сильных землетрясений выявила, что основная сейсмическая уязвимость железобетонных каркасных зданий связана с потерей прочности колонн и, как следствие, потерей их устойчивости. Особенно часто разрушению подвержены колонны нижних этажей, не способные сопротивляться инерционным горизонтальным нагрузкам в условиях перегрузки сжимающей силой. При этом следует выявить наиболее уязвимые «точки» несущих элементов каркасных зданий, работающих не только в условиях ожидаемой расчетной сейсмичности, но и в условиях активного проявления фоновых землетрясений, существенно влияющих на деградацию несущей способности железобетонных каркасных зданий.

К настоящему времени накоплен значительный арсенал результатов по вопросам исследования и развития сейсмостойкого строительства, комплексных методов расчета и усиления зданий и сооружений [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 23, 24]. В зависимости от уровня ответственности зданий и сооружений, а также периода повторяемости землетрясений с характерной интенсивностью для данной местности в соответствии с картами сейсмического районирования (ОСР), в качестве базовой сейсмической нагрузки может быть заложена величина, соответствующая проектному (ПЗ) или максимальному расчетному землетрясению (МРЗ) [1, 10, 11].

Результаты исследования и их анализ

При проектировании зданий и сооружений гражданского и промышленного назначения, в расчетах на особое сочетание принимает участие сейсмическая нагрузка, соответствующая ПЗ, периодичность которого (1 раз в 100 лет) полностью удовлетворяет сроку эффективной эксплуатации объекта. Однако, на протяжении всего срока жизни объекта, кроме расчетной сейсмической нагрузки, решающую роль также играет и физический износ, развитие которого ведет к структурным модификациям свойств материалов и неизбежной деградации технических характеристик несущих конструкций.

Необходимость учета временного износа при проектировании железобетонных конструкций зданий и сооружений определена требованиями [1, 10], регламентирующими создание таких расчетных моделей, в несущих и ненесущих элементах которых будут также учтены возможные упругие и неупругие деформации, а также хрупкие локальные разрушения.

Однако, эксплуатация зданий и сооружений в сейсмоопасных районах происходит не только в условиях риска возникновения землетрясений высокой (расчетной) интенсивности.

Немаловажную роль играют и фоновые землетрясения, интенсивность которых ниже расчетной. В районе Прибайкалья, например, фоновые динамические воздействия являются очень частым явлением. Подтверждением этому может служить Спитакское землетрясение 1988 г., когда на территории г. Ленинскана, благополучно уцелевшие после 9-балльного толчка 50 каркасных зданий, разрушились при повторном 8-балльном [8]. Это свидетельствует о том, что современные методы сейсмического расчета не учитывают эффекта накопления временной усталости и повреждений конструкций в процессе эксплуатации, значительно снижающих динамическую сопротивляемость здания в целом.

Кроме этого, в результате часто повторяющихся землетрясений «умеренного» характера происходит значительное ухудшение сцепления арматуры с бетоном, что приводит к появлению новых трещин в конструкциях. Я. М. Айзенберг [4] подтверждает, что снижение жесткости в железобетонных изгибаемых элементах может быть критичным и доходить до 30-40%.

Современные нормы [1] регламентируют производить расчет сейсмической нагрузки по формуле:

$$S_{ik}^j = k_0 k_1 S_{0ik}^j,$$

где k_0 – коэффициент, характеризующий назначение здания или сооружения, а так же степень их ответственности;

k_1 – коэффициент, учитывающий повреждения, допустимые для рассматриваемого здания или сооружения;

S_{0ik}^j – сейсмическая нагрузка i -ой формы колебания, которая вычисляется в предположении, что деформирование конструкций носит упругий характер:

$$S_{0ik}^j = m_k^j A \beta_i k_\psi n_{ik}^j,$$

где m_k^j – характеристика массы здания;

A – величина ускорения в уровне основания, принимаемая с учетом расчетной сейсмичности площадки;

β_i – коэффициент динамичности здания по i -ой форме колебания;

k_ψ – коэффициент, зависящий от конструктивной схемы и характеризующий пониженную способность здания рассеивать энергию;

n_{ik}^j – коэффициент, характеризуемый формой деформации здания.

Из вышеприведенных выражений видно, что расчет сейсмической нагрузки относится только к первоначальной оценке прочности конструкции на стадии проектирования и не учитывает влияние предыстории деформирования элементов во время расчетного землетрясения. Получается, что здание, запроектированное для расчетной динамической нагрузки, выдержит и сейсмическую нагрузку меньшей интенсивности. Однако, расчетные механические характеристики материалов могут деградировать в процессе эксплуатации. Кроме этого, нормами предполагается, что деформирование конструкций является исключительно упругим, что также вносит немаловажные искажения при определении расчетной сейсмической силы.

Анализ сейсмического риска в совокупности с численностью населения позволил проиндексировать некоторые населенные пункты в соответствии с необходимым, к настоящему времени, объемом антисейсмических усилений (таблица 1).

По данным целевой программы «Сейсмобезопасность территории РФ», еще в 2002 году количество проживающих в домах с дефицитом сейсмостойкости в 2-3 балла составило более 10 млн. человек (к 2020 году указанная цифра возросла в несколько раз). Таким образом, вопрос сейсмического износа зданий и сооружений остается открытым. Однако, некоторые сведения о негативном влиянии фоновых землетрясений отражены в [11]. В указанном стандарте учитывается снижение сейсмостойкости зданий и сооружений на коэффициент, равный 0,2; 0,5; 0,9, если они перенесли 1, 2, 3 землетрясения проектной силы.

Таблица 1 – Объекты, требующие первоочередного повышения сейсмостойкости

Регион	Индекс риска при расчетном землетрясении	Количество объектов, нуждающихся в усилении
Краснодарский край	9	1600
Камчатская область	8	270
Сахалинская область	8	460
Дагестан	7	690
Бурятия	5	485
Иркутская область	2,5	860

Инженерный анализ последствий некоторых разрушительных землетрясений позволил выявить ряд характерных слабых зон, приводящих к частичному или массовому разрушению железобетонных каркасных зданий. В особенности, опасны разрушения, связанные со снижением прочности колонн, и, как следствие, потерей их устойчивости, способной привести к прогрессирующему разрушению всего сооружения в целом.

Как показала практика, в каркасных зданиях особенно уязвимыми являются узлы сопряжения несущих элементов, подверженные внезапному воздействию значительных величин крутящих моментов и поперечных сил. Особенно часто прослеживается разрушение колонн нижних этажей, не способных сопротивляться инерционным горизонтальным нагрузкам в условиях перегрузки сжимающей силой (рисунок 1).

В этом случае происходит раздробление бетона в опорных узлах и в местах технологических швов, сопровождающееся выпучиванием арматуры.

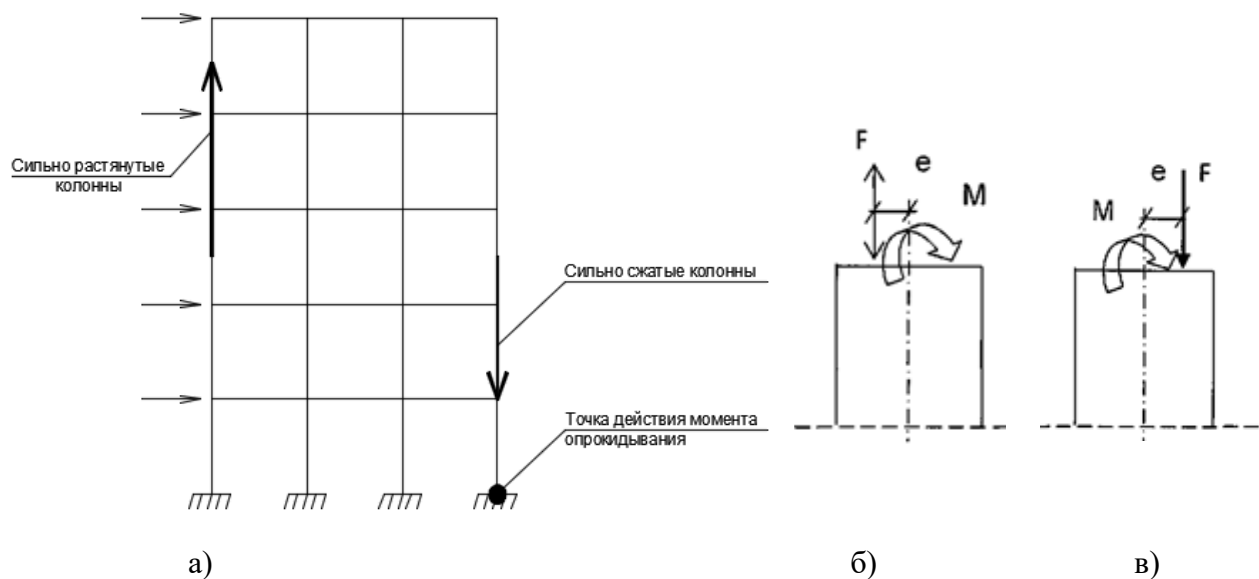


Рисунок 1 - Влияние сейсмической нагрузки на работу колонн каркаса: а – схема распределения усилий; б, в – дополнительные усилия, возникающие в крайних растянутых и сжатых колоннах

Рассматриваемая схема разрушения колонн связана с отсутствием работы элемента в упругой стадии и появлением многочисленных трещин, приводящих к снижению общей жесткости каркаса и увеличению его амплитуды колебания. В результате взаимного смещения оголовков колонн, увеличивается влияние моментной составляющей, что, в свою очередь, приводит к разрушению бетона по всей высоте элемента.

Опыт изучения землетрясений показывает, что зачастую степень разрушения зависит не только от интенсивности сейсмической нагрузки, но и от характеристик здания на момент возникновения землетрясений, а наиболее опасным считается начальный момент появления сейсмической волны, когда на свободные колебания здания после первого толчка, накладываются последующие вынужденные, что в сумме значительно увеличивает сейсмическую нагрузку. Возникающие же в процессе пластические зоны существенно уменьшают жесткость зданий и сооружений, меняют их динамическую сопротивляемость, а также величину и направление сейсмической силы, которые напрямую зависят от ускорения грунта и собственного ускорения сосредоточенных масс. Обобщенный инженерный анализ характера работы железобетонных каркасных зданий в результате землетрясений выявил следующие особенности:

- основные повреждения каркасных зданий связаны с разрушением колонн и узлов сопряжения несущих элементов (рисунок 2, 3);
- важным фактором обеспечения сейсмостойкости каркасных зданий является качество выполнения строительно-монтажных работ;
- повышения сейсмостойкости каркасного здания можно добиться при устройстве диафрагм жесткости, которые и при значительных повреждениях продолжают участвовать в пространственной работе сооружения, способствуя увеличению затухания колебаний;
- способность железобетонного каркаса к перераспределению напряжений при образовании пластического шарнира (в поврежденном узле) способно значительно защитить всю систему от разрушения.

К настоящему времени выполнено значительное количество исследований работы железобетонных элементов в условиях повышенной сейсмической активности, в частности,

результатом одних из них установлено, что прочность колонн с круглым сечением в два раза превосходит прочность колонн с квадратным сечением. Также доказано, что снижение сейсмостойкости колонн происходит в результате уменьшения соотношения геометрических характеристик элемента l/h :

- при $\frac{l}{h} \leq 2$ происходит понижение упругих свойств элемента, а разрушение происходит по наклонному сечению колонны;

- при $\frac{l}{h} > 2$ упругие свойства элемента повышаются, разрушение колонны начинается в результате достижения напряжений в продольной арматуре предела текучести.

Следует отметить, что изучение работы отдельных несущих элементов не дает четкого представления о комплексной работе рамной системы каркаса и его предельной несущей способности при сейсмических воздействиях. Это также связано и с тем фактом, что при работе за пределами упругости, в случае возникновения пластического шарнира, каркасным зданиям свойственно перераспределение усилий между соседними несущими элементами, что приводит к энергетическому и конструктивному резерву прочности здания в целом.

Строительными нормами в достаточной мере описан линейно-спектральный метод расчета конструкций на сейсмические воздействия. Этот метод предусматривает такое допущение, как упругое поведение материалов для упрощения математических расчетов. Следует отметить, что при упруго-пластической работе конструкции, понятие формы и частоты колебаний лишены физического смысла.

Метод предельного равновесия можно использовать как вспомогательный при оценке нелинейного деформирования здания с множеством степеней свободы. Однако, являясь статическим, указанный метод расчета не позволяет учесть цикличность и знакопеременность сейсмического нагружения.

Альтернативным методом расчета является нелинейный динамический расчет. Несмотря на трудоемкость шагово-итерационного процесса, только этот метод позволяет учесть физическую нелинейность поведения железобетонных элементов. При нелинейном расчете используется расчетная схема нелинейной работы конструкции. Кроме этого, при оценке НДС (напряженно-деформированного состояния) статически определимых конструкций применима любая модель нелинейности, а для статически неопределимых конструкций необходимо использовать наиболее вероятностные модели для исключения ошибок в определении внутренних усилий, напрямую зависящих от жесткости элемента.



Рисунок 2 – Разрушение узла здания с железобетонным каркасом (Спитакское землетрясение)



Рисунок 3 – Разрушение узлов здания с железобетонным каркасом рамно-связевой конструктивной схемы. Непроектное выполнение узла (Спитакское землетрясение)

Как известно, даже в условиях умеренной фоновой сейсмоактивности, железобетонные сжато-изогнутые элементы находятся в сложном напряженном состоянии, частота и уровень которого достаточны для возникновения и накопления внутренних повреждений.

При незначительных сейсмических воздействиях железобетонные каркасные здания способны работать как упругие системы, однако в условиях реальных землетрясений распределение внутренних усилий, фактически значительно отличается от найденных в ходе расчета упругой системы. С увеличением нагрузки существенно возрастают неупругие деформации, наблюдается значительное трещинообразование, а прямопропорциональная зависимость между нагрузкой и усилиями искажается и практически исчезает.

Таким образом, в условиях нелинейной работы материалов конструкции, деградации механических свойств арматуры и бетона, непрерывного изменения внешних воздействий происходит перераспределение напряжений между арматурной сталью и бетоном конструктивного элемента. Указанные факторы неизбежно приводят к образованию пластических шарниров в системе в области наибольших повреждений. В результате перераспределения усилий происходит дополнительное локальное разрушение в местах предельных деформаций с выключением связей, которое существенно влияет на изменение жесткости системы и механизм разрушения. Этот фактор опасен неизбежным изменением расчетной схемы здания, так как сейсмическая сила зависит не только от значения ускорения грунта основания, но и от инерционных характеристик самой каркасной системы [5, 6, 7, 12, 22].

В качестве расчетной модели рассмотрена пространственная схема железобетонного каркасного здания жилого дома в г. Комрат Республики Молдова. Расчет выполнен при помощи многофункционального программного комплекса «ЛИРА» на статические и сейсмические нагрузки.

Исследуемое здание шестнадцатизэтажное каркасное с подвалом. Высота этажа составляет 3,0 м., перекрытие монолитное толщиной 160 мм, сечение колонн 0,4х0,4 м., ригелей 0,6х0,4 м., толщина железобетонных диафрагм жесткости 200 мм. Расчетная схема содержит 24827 узлов и 29674 конечных элементов. Сейсмичность площадки 8 баллов [1, 13, 14].

В результате статических и динамических расчетов с учетом действия проектной сейсмики получены: максимальные перемещения узлов сопряжения ригелей и колонн; максимальные усилия в несущих элементах; периоды и частота колебаний пространственной системы при сейсмическом нагружении; формы колебания системы и другие значения.

Полученные результаты были сопоставлены с проектным решением для оценки несущей способности здания в условиях расчетного землетрясения.

Расчет и анализ поперечных сечений и фактического армирования несущих элементов каркаса показали, что особую опасность представляет наличие перегрузки колонн с 1 по 4 этажи, а также большие значения горизонтальных и вертикальных смещений в узлах сопряжения ригелей и колонн верхних этажей в результате вынужденных колебаний системы.

С целью исследования механизма перераспределения усилий между колоннами пространственной модели жилого здания смоделировано разрушение колонн первого этажа. Расчет выполнен по двум вариантам с учетом вертикального смещения верха колонн на 20 и 50 мм.

Оценка полученных результатов расчета показала, что смещение верха колонн первого этажа на 20 мм способно увеличить усилия в некоторых колоннах в 1,07... 1,09 раз, а смещение до 50 мм – в 1,2 ... 1,3 раза. Кроме этого, в случае перераспределения усилий, несущая способность колонн нижних этажей оказалась недостаточной, а перегрузка варьируется в диапазоне от 8 до 40 %.

Также следует отметить следующее:

- анализ полученного спектра отклика на основе экспериментальных акселерограмм землетрясений 5-8 балльной интенсивности дал четкое представление о механизме деформирования бетона колонны, подтвердив степень влияния активных фоновых землетрясений на дальнейшую несущую способность элемента в результате накопления остаточных деформаций и эксплуатационного износа здания. Полученные результаты подтвердили высокую вероятность развития микротрещин в несущих элементах каркаса, способствующих деградации физических и конструктивных свойств;

- наиболее опасным для конструкции является начальный момент появления сейсмической волны, связанный с наложением на свободные колебания здания после первого толчка последующих вынужденных. Указанный фактор играет решающую роль на начальной стадии землетрясений и способен увеличить сейсмическую нагрузку в несколько раз;

- расчет многоэтажного железобетонного каркасного здания подтвердил, что наиболее уязвимыми элементами, влияющими на общую сейсмостойкость здания, являются колонны нижних этажей (с 1-го этажа по 4-й), перегруженные вертикальной нагрузкой в условиях действия горизонтальных инерционных сил, а также рамная система верхних этажей, отличающаяся наибольшей амплитудой колебаний в силу высокой гибкости каркасных зданий.

Повреждение железобетонных каркасных зданий во время землетрясений зачастую случается из-за недостаточной прочности бетона колонн и ригелей, а также из-за слабого поперечного армирования элементов. Поэтому усиление конструкций обеспечивается увеличением поперечного сечения несущих элементов при помощи металлической обоймы из жесткой и гибкой арматуры. Однако, в этом случае необходимо строгое соблюдение конструктивных решений, необходимых для обеспечения совместной работы тела конструкции и элементов усиления [15, 16, 17].

Подобный эффект обеспечивается при сварке старой арматуры и арматуры усиления, а также в случае предварительного напряжения поперечной арматуры элемента.

При усилении стыков сопряжения несущих элементов сборного железобетонного каркаса целесообразно использовать стальные накладки, железобетонные обоймы, профильный прокат, инвентарные стяжные болты, П-образные арматурные скобы [18].

Дефицит поперечного армирования опорных участков ригелей целесообразно компенсировать устройством дополнительных хомутов с концевыми муфтами или полноценной металлической обоймы [20].

В целом, методы усиления и повышения сейсмостойкости зданий и сооружений можно классифицировать по трем группам:

1. комплексные методы восстановления несущих элементов (простенки, колонны, ригели, плиты перекрытия) в случае повышения сейсмостойкости здания, а также при ликвидации последствий землетрясения;

2. мероприятия, направленные на восстановление связей и узлов сопряжения между отдельными элементами здания (узлы сопряжения колонн, ригелей и колонн, колонны и фундамента и т. д.) [16, 18];

3. мероприятия по увеличению пространственной жесткости здания в целом, направленные на восстановление способности системы к восприятию и распределению динамической нагрузки между несущими элементами.

Подробная классификация методов усиления железобетонных конструкций представлена в [21].

В случае недостаточной несущей способности приопорных сечений ригелей целесообразным является усиление при помощи устраиваемых вугтов и добавление верхней арматуры с последующим замоноличиванием добавленного слоя.

Если здание было запроектировано без учета сейсмического воздействия, особое внимание необходимо уделить усилению центральной зоны узлов поперечных рам каркаса. Такое усиление можно обеспечить благодаря жесткому соединению металлических обойм колонн ниже и выше расположенных этажей, причем длина распространения обойм принимается не менее $1,5 h$, где h – высота сечения обоймы колонн [19].

В силу того, что расчетная сейсмическая нагрузка для жилых зданий представляет собой редкий характер, абсолютная конструктивная сохранность здания в данном случае является экономически невыгодной. Поэтому в элементах каркаса допустимы пластические деформации, незначительные повреждения и локальные разрушения, не вызывающие полного или частичного обрушения здания.

В этом случае, расчет несущих элементов каркаса при сейсмическом нагружении производится по первой группе предельных состояний, исключая:

- невозможность дальнейшей эксплуатации здания в результате больших остаточных деформаций (состояние 1а);

- потерю несущей способности конструкций, критически влияющую на безопасность людей и сохранность дорогостоящего оборудования (состояние 1б).

Предотвращение наступления предельного состояния 1а необходимо для систем, в которых недопустимо наличие остаточных деформаций, приводящих к капитальным ремонтам и замене отдельных конструктивных элементов.

Предельное состояние 1б допускает возникновение значительных остаточных деформаций и местные, незначительные разрушения элементов. При этом, дальнейшая

эксплуатация здания (в случае предельного состояния 1б) возможна только после ремонта, усиления или замены отдельных элементов конструкции.

Результаты исследований показали, что при сейсмическом усилении многоэтажных железобетонных каркасных зданий, в основном, возникает необходимость усиления колонн. При оценке наиболее эффективного варианта повышения сейсмостойкости конструкции, было выявлено, что наиболее рациональным методом является заключение колонн в металлические обоймы, выполненные из четырех уголков и стальных планок, установленных с определенным шагом по всей высоте конструктивного элемента.

Выводы

1. Основная причина массового разрушения многоэтажных железобетонных каркасных зданий связана с потерей устойчивости колонн нижних этажей, не способных более сопротивляться горизонтальным инерционным сейсмическим силам в условиях перегрузки вертикальной нагрузкой от вышележащих конструкций. Стадия разрушения железобетонных колонн каркаса сопровождается потерей устойчивости и выпучиванием продольной арматуры при слабом косвенном армировании.

2. В силу высоких показателей гибкости, колонны железобетонных каркасных зданий при землетрясениях подвержены разрушениям в результате существенного изгиба в совокупности с внецентренным сжатием, в то же время несущая способность горизонтальных элементов используется всего на 50-70%.

3. Повышение класса бетона позволяет повысить сейсмостойкость несущих элементов каркасных зданий до 30 %. В то же время, увеличение коэффициента армирования и учащение шага хомутов в железобетонных колоннах способно повысить сейсмостойкость здания до 50 %.

4. Численным моделированием работы многоэтажного железобетонного каркасного здания установлено, что в результате перенесенных 1, 2 и 3 ПЗ в условиях отсутствия значительных видимых деформаций и разрушений конструкций, сейсмостойкость здания снижается на коэффициент, равный 0,2; 0,5 и 0,9 соответственно.

5. Смещение верха колонн первого этажа значительно увеличивает усилия в других колоннах, а именно: при смещении на 2 см, усилия возрастают в 1,07...1,09 раз, а при смещении до 5 см – в 1,2...1,3 раза.

6. Усиление железобетонных колонн металлическими обоймами позволяет распределить разрушение по всему телу конструкции, в отличие от неусиленных колонн, у которых механизм разрушения принимает локализованный характер, сопровождающийся выпучиванием арматуры в виде «стальных цветов», дроблением бетона в узлах сопряжения с ригелями, а также в местах технологических швов.

7. Усиление колонн многоэтажных железобетонных каркасных зданий П-образными элементами из арматурных стержней позволяет повысить общую сейсмостойкость здания в 1,3 раза.

8. Усиление железобетонных колонн нижних этажей обоймой, выполненной из четырех уголков и распределенных по высоте элемента металлических планок, способно повысить сейсмостойкость здания более чем в 1,5 раза [19].

9. В результате выполненного технико-экономического анализа установлено, что своевременное усиление железобетонных колонн каркасных зданий в сейсмоопасных районах позволяет снизить индекс сейсмического риска на 40-60 %, а материальный ущерб – более чем в 2,5 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. М.: Минстрой России, ФЦС, 2016. 126 с.
2. СП 115.13330.2016. Геофизика опасных природных воздействий. Минстрой России, 2012. 57 с.
3. Масляев А.В. Сейсмостойкость зданий с учетом повторных сильных толчков при землетрясении // Промышленное и гражданское строительство. 2008. №3. С. 45-47.
4. Айзенберг Я.М., Нейман А.И. Оценка сейсмостойкости сооружений и экономической целесообразности их восстановления после землетрясения // Строительная механика и расчет сооружений. 1974. №4. С. 9-13.
5. Алмазов В.О. Динамика прогрессирующего разрушения монолитных многоэтажных каркасов // Промышленное и гражданское строительство. 2010. №4. С. 52-56.
6. Жарницкий В.И. Поперечные колебания сооружения с учетом вертикальной нагрузки от собственного веса // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. №3. С. 28-31.
7. Никитин И.К. Проектирование многоэтажных зданий с железобетонным каркасом для сейсмических районов. М.: ОАО НИИПромзданий. 2008. 146 с.
8. Тамразян А.Г. Анализ риска обрушения зданий и сооружений от критических дефектов и различных техногенных воздействий. М.: МГСУ, 2004. 106 с.
9. СП 31-114-2004. Правила проектирования жилых и общественных зданий для строительства в сейсмических районах. М.: ФГУП ЦПП, 2005. 46 с.
10. ГОСТ Р 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2015.
11. ГОСТ Р 57546-2017. Землетрясения. Шкала сейсмической активности.
12. Кабанцев О.В. О достоверности оценки сейсмостойкости зданий на основе результатов диагностики методом импульсного воздействия малой интенсивности // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. №2. С. 46-51.
13. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. М.: 2011. 79 с.
14. Мирсаяпов И.Т., Нуриева Д.М. Оценка сейсмостойкости многоэтажных каркасных зданий с учетом нелинейного поведения конструкций и взаимодействия с основанием // Теория инженерных сооружений и строительные конструкции. 2005. №3. С. 24-27.
15. Мартемьянов А.И. Восстановление сооружений в сейсмических районах. М.: Стройиздат, 1990. 264 с.
16. Бедов А.И., Арутюнян Р.Г. К определению рационального уровня восстановления и усиления поврежденных зданий // Экологическая безопасность в строительстве. 1998. №7. С. 30-33.
17. СТО НОСТРОЙ/НОП 2.7.143-2014. Повышение сейсмостойкости существующих многоэтажных каркасных зданий. Проектирование и строительство. Правила, контроль выполнения и требования к результатам работ. М.: НОСТРОЙ/НОП, 2014. 89 с.
18. Гончаров М.Е. Исследование прочности и деформативности стыков железобетонных колонн, усиленных металлическими обоймами // Актуальные проблемы строительной отрасли. 2009. №66. С. 42-43.
19. Гроздов В.Т., Теряник В.В. О прочности и деформативности колонн, усиленных обоймами // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1989. №3. С. 8-11.
20. Бедов А.И., Арутюнян Р.Г. Некоторые особенности расчета усиления изгибаемых железобетонных элементов // Сейсмостойкое строительство. 2000. №3. С. 8-12.
21. Бедов А.И., Габитов А.И., Знаменский В.В. Оценка технического состояния, восстановление и усиление оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений: Учеб. пособие / Под ред. А.И. Бедова в 2-х ч. Часть 2. Восстановление и усиление оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений. М.: Изд. АСВ, 2017. 924 с.
22. Бедов А.И., Тамразян А.Г., Арутюнян Р.Г. Влияние сухого и вязкого трения при сейсмических колебаниях зданий и сооружений // Сейсмическое строительство. 1998. №4. С. 26-29.
23. Бедов А.И. Балакшин А.С., Воронов А.А. Причины аварийных ситуаций в ограждающих конструкциях из каменной кладки многослойных систем в многоэтажных жилых зданиях // Строительство и реконструкция. 2014. №6. С. 11-17.
24. Бедов А.И., Габитов А.И., Салов А.С., Гайсин А.М., Хабибуллина Л.И. Применение компьютерного моделирования при оптимизации сечений элементов железобетонного каркаса // Строительство и реконструкция. 2018. №6. С. 3-13.

REFERENCES

1. SP 14.13330.2018. Stroitel'stvo v seismicheskikh rajonah [Construction in seismic areas]. M.: Minstroy Rossii, FCS. 2016. 126 p.
2. SP 115.13330.2016. Geofizika opasnykh prirodnkh vozhdejstvij [Geophysics of hazardous natural impacts]. Minstroy Rossii. 2012. 57 p.
3. Maslyayev A.V. Sejsmostojkost' zdaniy s uchetoм povtornykh sil'nykh tolchkov pri zemletryaseniі [Seismic resistance of buildings, taking into account repeated strong shocks during an earthquake]. *Industrial and civil construction*. 2008. No. 3. Pp. 45-47.
4. Ajzenberg YA. M., Nejman A.I. Ocenka sejsmostojkosti sooruzhenij i ekonomicheskoy celesoobraznosti ih vosstanovleniya posle zemletryaseniya [Assessment of the seismic resistance of structures and the economic feasibility of their restoration after an earthquake]. *Structural mechanics and calculation of structures*. 1974. No. 4. Pp. 9-13.
5. Almazov V.O. Dinamika progressivnykh razrusheniya monolitnykh mnogoetazhnykh karkasov [The dynamics of progressive destruction of monolithic multi-storey frames]. *Industrial and civil construction*. 2010. No. 4. Pp. 52-56.
6. ZHarnickij V.I. Poperechnye kolebaniya sooruzheniya s uchetoм vertikal'noj nagruzki ot sobstvennogo vesa [Lateral vibrations of the structure, taking into account the vertical load from its own weight]. *Earthquake resistant construction. Safety of structures*. 2013. No. 3. Pp. 28-31.
7. Nikitin I.K. Proektirovanie mnogoetazhnykh zdaniy s zhelezobetonnykh karkasom dlya seismicheskikh rajonov [Design of multi-storey buildings with a reinforced concrete frame for seismic areas]. M.: OAO NIIPromzdaniy. 2008. 146 p.
8. Tamrazyan A.G. Analiz riska obrusheniya zdaniy i sooruzhenij ot kriticheskikh defektov i razlichnykh tekhnogennykh vozhdejstvij [Analysis of the risk of collapse of buildings and structures from critical defects and various technogenic impacts]. M.: MGSU. 2004. 106 p.
9. SP 31-114-2004. Pravila proektirovaniya zhilykh i obshchestvennykh zdaniy dlya stroitel'stva v seismicheskikh rajonah [Rules for the design of residential and public buildings for construction in seismic areas]. M.: FGUP CPP, 2005. 46 p.
10. GOST R 27751-2014. Nadezhnost' stroitel'nykh konstrukcij i osnovanij. Osnovnye polozeniya [Reliability of building structures and foundations. Basic provisions]. M.: Standartinform. 2015.
11. GOST R 57546-2017. Zemletryaseniya. SHkala seismicheskoy aktivnosti [Earthquakes. Seismic activity scale].
12. Kabancev O.V. O dostovernosti ocenki sejsmostojkosti zdaniy na osnove rezul'tatov diagnostiki metodom impul'snogo vozhdejstviya maloj intensivnosti [About the reliability of assessing the seismic resistance of buildings based on the diagnostic results by the method of low-intensity impulse exposure]. *Earthquake resistant construction. Safety of structures*. 2013. No. 2. Pp. 46-51.
13. SP 20.13330.2016. Nagruzki i vozhdejstviya. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.01.07-85* [Loads and impacts. Updated edition of SNiP 2.01.07-85*]. M.: 2011. 79 p.
14. Mirsayapov I.T., Nurieva D.M. Ocenka sejsmostojkosti mnogoetazhnykh karkasnykh zdaniy s uchetoм nelinejnogo povedeniya konstrukcij i vzaimodejstviya s osnovaniem [Assessment of seismic resistance of multi-storey frame buildings, taking into account the nonlinear behavior of structures and interaction with the foundation]. *Theory of engineering structures and building structures*. 2005 No. 3. Pp. 24-27.
15. Martem'yanov A. I. Vosstanovlenie sooruzhenij v seismicheskikh rajonah [Restoration of structures in seismic areas]. M.: Strojizdat. 1990. 264 p.
16. Bedov A.I., Arutyunyan R.G. K opredeleniyu racional'nogo urovnya vosstanovleniya i usileniya povrezhdennykh zdaniy [Determining the rational level of restoration and strengthening of damaged buildings]. *Environmental safety in construction*. 1998 No. 7. Pp. 30-33.
17. STO NOSTROJ/NOP 2.7.143-2014. Povyshenie sejsmostojkosti sushchestvuyushchih mnogoetazhnykh karkasnykh zdaniy. Proektirovanie i stroitel'stvo. Pravila, kontrol' vypolneniya i trebovaniya k rezul'tatam rabot [Increasing the seismic resistance of existing multi-storey frame buildings. Design and construction. Rules, performance control and requirements for work results]. M.: NOSTROJ/NOP. 2014. 89 p.
18. Goncharov M.E. Issledovanie prochnosti i deformativnosti stykov zhelezobetonnykh kolonn, usilennykh metallicheskimy obojmami [Investigation of the strength and deformability of the joints of reinforced concrete columns, reinforced with metal clips]. *Actual problems of the construction industry*. 2009 No. 66. Pp. 42-43.
19. Grozdov V.T., Teryanik V.V. O prochnosti i deformativnosti kolonn, usilennykh obojmami [About the strength and deformability of columns reinforced with cages]. *Proceedings of universities. Construction and architecture*. 1989. No. 3. Pp. 8-11.

20. Bedov A.I., Arutyunyan R.G. Nekotorye osobennosti rascheta usileniya izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov [Some features of the calculation of the reinforcement of bent reinforced concrete elements]. *Earthquake resistant construction*. 2000. No. 3. Pp. 8-12.

21. Bedov A.I., Gabitov A.I., Znamenskij V.V. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya, vosstanovlenie i usilenie osnovanij i stroitel'nykh konstrukcij ekspluatiruemykh zdaniy i sooruzhenij: Ucheb. posobie / Pod red. A.I. Bedova v 2-h ch. CHast' 2. Vosstanovlenie i usilenie osnovanij i stroitel'nykh konstrukcij ekspluatiruemykh zdaniy i sooruzhenij [Assessment of the technical condition, restoration and strengthening of foundations and building structures of buildings and structures in use. Study guide, ed. A.I. Bedov in 2 hours. Part 2. Restoration and strengthening of foundations and building structures of operated buildings and structures]. M.: Edition ASV. 2017. 924 p.

22. Bedov A.I., Tamrazyan A.G., Arutyunyan R.G. Vliyanie suhogo i vyazkogo treniya pri sejsmicheskikh kolebaniyakh zdaniy i sooruzhenij [The influence of dry and viscous friction during seismic vibrations of buildings and structures]. *Seismic construction*. 1998. No. 4. Pp. 26-29.

23. Bedov A.I. Balakshin A.S., Voronov A.A. Prichiny avarijnykh situacij v ograzhdayushchih konstrukciyakh iz kamennoj kladki mnogoslojnykh sistem v mnogoetazhnykh zhilykh zdaniyakh [Causes of emergencies in enclosing structures made of masonry of multilayer systems in multi-storey residential buildings]. *Building and reconstruction*. 2014. No. 6. Pp. 11-17.

24. Bedov A.I., Gabitov A.I., Salov A.S., Gajsin A.M., Habibullina L.I. Primenenie komp'yuternogo modelirovaniya pri optimizacii sechenij elementov zhelezobetonnoho karkasa [Application of computer modeling to optimize cross-sections of reinforced concrete frame elements]. *Building and reconstruction*. 2018. No. 6. Pp. 3-13.

Информация об авторах:

Бедов Анатолий Иванович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций. E-mail: gbk@mgsu.ru

Николенко Ирина Игоревна

ООО «Восток-Техника» г. Москва, Россия ведущий инженер, магистр ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». E-mail: gontcaira@list.ru

Information about authors:

Bedov Anatolii Iv.

Federal state budget educational institution of higher education "MOSCOW STATE UNIVERSITY OF CIVIL ENGINEERING (NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY)", Moscow, Russia, candidate of technical sciences, Professor, Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures. E-mail: gbk@mgsu.ru

Nikolenko Irina Ig.

LLC "Vostok-Tekhnika", Moscow, Russia, master, leading engineer. E-mail: gontcaira@list.ru

П.Д. ДЕМИНОВ¹

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ ЛЕЖАЩЕЙ НА СТОХАСТИЧЕСКОМ УПРУГОМ ОСНОВАНИИ С ДВУМЯ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ПОДАТЛИВОСТИ, ПО НАКЛОННОМУ СЕЧЕНИЮ ОТ ПОПЕРЕЧНОЙ СИЛЫ

Аннотация. В статье получена оценка вероятности разрушения по наклонному сечению от действия поперечной силы при изгибе, а также суммарной вероятности наступления предельных состояний железобетонной балки с вероятностными параметрами прочности, лежащей на упругом основании модели В.З. Власова-П.Л. Пастернака, обладающей стохастическими свойствами. Построены вероятностные характеристики поперечной силы и плотность её распределения для фундаментной балки, покоящейся на упругом основании с двумя случайными характеристиками, нагруженной квазистационарной случайной нагрузкой, с учетом вероятностного характера прочностных свойств бетона и арматуры. Показано, что если спектральные плотности коэффициентов постели и нагрузки являются дробно-рациональными функциями, корреляционные функции прогибов и, соответственно, дисперсия прогибов вычисляются с помощью теории вычетов.

Ключевые слова: железобетонная балка, упругое основание, математическое ожидание, дисперсия, корреляционная функция, поперечная сила, вероятность разрушения, наклонное сечение.

P.D. DEMINOV¹

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

ESTIMATION OF THE FAILURE PROBABILITY OF A REINFORCED CONCRETE BEAM LYING ON A STOCHASTIC ELASTIC BASE WITH TWO PRESSURE COEFFICIENTS, ON AN INCLINED SECTION FROM THE LATERAL FORCE

Abstract. The estimate of failure probability on the inclined section from the action of transverse forces, as well as the total probability of the limit States of reinforced concrete beams with probabilistic strength parameters lying on an elastic Foundation model V.Z. Vlasov-P.L. Pasternak, possessing stochastic properties. Probabilistic characteristics of the transverse force and its distribution density are constructed for a Foundation beam resting on an elastic base with two random characteristics, loaded with a quasi-stationary random load, taking into account the probabilistic nature of the strength properties of concrete and reinforcement. It is shown that if the spectral densities of the bed and load coefficients are fractional rational functions, the deflection correlation functions and, accordingly, the deflection variance are calculated using the residue theory.

Keywords: reinforced concrete beam, elastic foundation, mathematical expectation, dispersion, correlation function, shear force, probability of failure, inclined section.

Введение

В работах [1,2] рассматривались вероятности наступления предельных состояний в железобетонной балке на упругом основании со случайными свойствами: $\mathbb{P}_{M_{ult}}$ - от действия

изгибающего момента и $\mathbb{P}_{[w]}$ - от возникновения чрезмерных прогибов. Влияние изменчивости параметров железобетонной балки на надежность при разных условиях работы рассмотрена в трудах [3,4].

В данной работе рассматривается разрушение железобетонной балки по наклонному сечению от действия поперечной силы. Балка имеет случайную жесткость $B(R)$, как функцию случайной гауссовой кубиковой прочности бетона R , и лежит на упругом стохастически неоднородном основании с двумя коэффициентами постели $C_1(x)$ и $C_2(x)$ при этом загружена случайной квазистационарной нормально распределенной нагрузкой $q(x)$ с математическим ожиданием $\langle q(x) \rangle$ и центрированной стационарной случайной составляющей $q^*(x)$. Предполагается, что трещиностойкость балки обеспечена.

Метод

Пусть случайная кубиковая прочность бетона получила конкретную реализацию R , при этом изгибная жесткость балки будет равна $B_0(R)$, а случайная нагрузка $q(x)$ с корреляционной функцией $K_q(x - x')$ представлена U произвольными случайными сосредоточенными силами P_j с математическими ожиданиями $\langle P_j \rangle$ и N произвольными случайными распределенными нагрузками $q_i(x)$ с математическими ожиданиями $\langle q_i(x) \rangle$, как показано на рисунке 1.

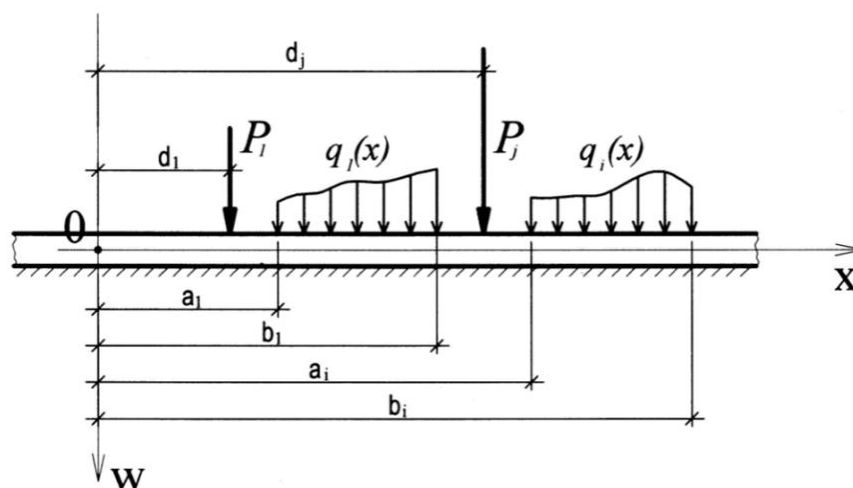


Рисунок 1 - Схема нагружения балки

Уравнение изгиба балки бесконечной длины постоянного сечения на упругом основании с двумя характеристиками хорошо известно и имеет в стохастической постановке следующий вид [5]:

$$B(R) \frac{d^4 w(x)}{dx^4} = C_2(x) \frac{d^2 w(x)}{dx^2} - C_1(x) w(x) + q(x). \quad (1)$$

Для решения уравнения (1) будем использовать метод малого параметра. Представим случайные функции $w(x)$, $C_1(x)$, $C_2(x)$ и $q(x)$ в виде сумм их неслучайных математических ожиданий $\langle C_1 \rangle$, $\langle C_2 \rangle$, $\langle q(x) \rangle$ и $\langle w(x) \rangle$ и центрированных

случайных составляющих $C_1^*(x)$, $C_2^*(x)$ и $q^*(x)$, которые есть стационарные случайные функции, и $w^*(x)$, которая в общем случае является нестационарной случайной функцией.

Выражение для математического ожидания прогибов балки $\langle w(x) \rangle$, аналогичное решению в детерминированной постановке [2], будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \langle w(x, R) \rangle = & - \frac{1}{4B_0(R) \alpha \beta (\alpha^2 + \beta^2)} \cdot \\ & \cdot \left\{ \sum_{i=0}^N \int_{a_i}^{b_i} \langle q_i(x_i) \rangle e^{-\alpha|x-x_i|} [\beta \cos \beta(x-x_i) + \alpha \sin \beta |x-x_i|] dx_i + \right. \\ & \left. + \sum_{j=0}^U \langle P_j \rangle e^{-\alpha|x-d_j|} [\beta \cos \beta(x-d_j) + \alpha \sin \beta |x-d_j|] \right\}, \quad x \geq 0, \quad (2) \end{aligned}$$

здесь $\alpha(R) = \left(\sqrt{\frac{\langle C_1 \rangle}{4B_0(R)}} + \frac{\langle C_2 \rangle}{4B_0(R)} \right)^{\frac{1}{2}}$; $\beta(R) = \left(\sqrt{\frac{\langle C_1 \rangle}{4B_0(R)}} - \frac{\langle C_2 \rangle}{4B_0(R)} \right)^{\frac{1}{2}}$.

Для математического ожидания поперечной силы после дифференцирования трижды по x выражения (2) имеем (3):

$$\begin{aligned} \langle Q(x, R) \rangle = & - \frac{1}{4\alpha \beta} \left\{ \sum_{i=0}^N \int_{a_i}^{b_i} \langle q_i(x_i) \rangle e^{-\alpha|x-x_i|} [(\alpha^2 - \beta^2) \sin \beta |x-x_i| - \right. \\ & \left. - 2\alpha \beta \cos \beta(x-x_i)] dx + \right. \\ & \left. + \sum_{j=0}^U \operatorname{sgn}(x-d_j) \frac{\langle P_j \rangle}{2} e^{-\alpha|x-d_j|} [(\alpha^2 - \beta^2) \sin \beta |x-d_j| - 2\alpha \beta \cos \beta(x-d_j)] \right\}, \quad (3) \end{aligned}$$

где $\operatorname{sgn}(z)$ – сигнум-функция Кронекера [6]; $x \geq 0$.

Для нахождения корреляционной функции прогибов используем метод спектральных представлений, учитывая при этом, что корреляционная функция и спектральная плотность случайного процесса составляют пару преобразования Н. Винера-А.Я. Хинчина [7]. Так как передаточная функция $H(\omega, R)$ уравнения (1) будет иметь вид:

$$H(\omega, R) = \frac{1}{J(\omega, R)} = \frac{1}{[B_0(R)\omega^4 + \langle C_2 \rangle \omega^2 + \langle C_1 \rangle]},$$

то, используя известное соотношение между спектральной плотностью $S_\Phi(\omega)$ на входе в динамическую систему и спектральной плотностью $S_w(\omega)$ на выходе из этой системы, получаем спектральную плотность прогибов:

$$S_w(\omega, R) = |H(\omega, R)|^2 S_\Phi(\omega) = \frac{S_\Phi(\omega, R)}{[B_0(R)\omega^4 + \langle C_2 \rangle \omega^2 + \langle C_1 \rangle]^2}.$$

Входную спектральную плотность $S_\Phi(\omega, R)$ правой части уравнения (1), учитывая стационарность случайных функций отпоров основания $C_1^*(x)$ и $C_2^*(x)$ и нагрузки $q^*(x)$, представим следующим образом:

$$S_\Phi(\omega, R) = \langle w(x, R) \rangle^2 S_{C_1}(\omega) + \left(\frac{d^2 \langle w(x, R) \rangle}{dx^2} \right)^2 \cdot S_{C_2}(\omega) + S_q(\omega).$$

В исследованиях [8] и [9] по результатам испытаний грунтов было рекомендовано принимать корреляционную функцию коэффициента постели в виде:

$$K_{C_i}(x - x') = D_{C_i} \exp(-v_i |x - x'|) \cos[\varphi_i(x - x')], \quad v_i > 0, \varphi_i > 0, \quad (4)$$

где v_i - коэффициенты, характеризующий затухание корреляционных свойств по мере удаления точек x и x' друг от друга, φ_i - коэффициенты, отражающий скрытые периодичности корреляционных свойств основания, методика определения этих коэффициентов приведена, например, в работе [10].

Для корреляционной функции вида (4) спектральная плотность коэффициента отпора основания будут иметь вид дробно-рациональных функций [11,12]:

$$S_{C_i}(\omega) = D_{C_i} \frac{v_i}{\pi} \left\{ \frac{\omega^2 + v_i^2 + \varphi_i^2}{[\omega^4 + 2(v_i^2 - \varphi_i^2)\omega^2 + (v_i^2 + \varphi_i^2)]} \right\}. \quad (5)$$

Учитывая, что де факто наблюдается затухание корреляции значений случайной функции нагрузки $q^*(x)$ по мере увеличения расстояния между двумя сечениями балки с координатами x и x' , корреляционную функцию нагрузки можно принять в виде:

$$K_q(x - x') = D_q \exp(-v_q |x - x'|), \quad v_q > 0,$$

где D_q - дисперсия нагрузки, тогда спектральная плотность случайной функции нагрузки будет иметь вид [10]:

$$S_q(\omega) = D_q \frac{2v_q}{\pi(\omega^2 + v_q^2)}. \quad (6)$$

Дисперсия прогибов балки будет определяться обратным преобразованием Н. Винера - А.Я. Хинчина спектральных плотностей случайных функции правой части уравнения (1) при $x = x'$:

$$\begin{aligned} D_w(x, R) = & 2 \langle w(x, R) \rangle^2 \int_0^\infty \frac{S_{C_1}(\omega) d\omega}{[B_0(R)\omega^4 + \langle C_2 \rangle \omega^2 + \langle C_1 \rangle]^2} + \\ & + 2 \left(\frac{d^2 \langle w(x, R) \rangle}{dx^2} \right)^2 \int_0^\infty \frac{S_{C_2}(\omega) d\omega}{[B_0(R)\omega^4 + \langle C_2 \rangle \omega^2 + \langle C_1 \rangle]^2} + \\ & + 2 \int_0^\infty \frac{S_q(\omega) d\omega}{[B_0(\bar{R})\omega^4 + \langle C_2 \rangle \omega^2 + \langle C_1 \rangle]^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Дифференцируя выражение (7) трижды и подставляя спектральные плотности (5) и (6), получаем для дисперсии поперечной силы:

$$\begin{aligned}
 D_Q(x, R) = & 2B_0^2(R) \langle w(x, R) \rangle^2 * \\
 & * D_{c_1} \frac{v_1}{\pi} \int_0^\infty \frac{[\omega^8 + (v_1^2 + \varphi_1^2)\omega^6]d\omega}{[\omega^2 - (v_1^2 + \varphi_1^2)]^2 [B_0(R)\omega^4 + \langle C_2 \rangle \omega^2 + \langle C_1 \rangle]^2} + \\
 & + 2B_0^2(R) \left[\frac{d^2 \langle w(x, R) \rangle}{dx^2} \right]^2 D_{c_2} \frac{v_2}{\pi} \int_0^\infty \frac{[\omega^8 + (v_2^2 + \varphi_2^2)\omega^6]d\omega}{[\omega^2 - (v_2^2 + \varphi_2^2)]^2 [B_0(R)\omega^4 + \langle C_2 \rangle \omega^2 + \langle C_1 \rangle]^2} \\
 & + \\
 & + 4B_0^2(R) D_q \frac{v_q}{\pi} \int_0^\infty \frac{\omega^6 d\omega}{(\omega^2 + v_q^2) [B_0(R)\omega^4 + \langle C_2 \rangle \omega^2 + \langle C_1 \rangle]^2} . \quad (8)
 \end{aligned}$$

Корреляционные функции, спектральные плотности которых являются дробно-рациональными функциями вида:

$$\begin{aligned}
 S(\omega) = & C \frac{|(i\omega)^m + b_1(i\omega)^{m-1} + \dots + b_m|^2}{|(i\omega)^n + a_1(i\omega)^{n-1} + \dots + a_n|^2} = \\
 = & C \frac{\omega^{2m} + B_1\omega^{2(m-1)} + \dots + B_m}{\omega^{2n} + A_1\omega^{2(n-1)} + \dots + A_n},
 \end{aligned}$$

где коэффициенты $a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m, A_1, \dots, A_n$ и B_1, \dots, B_m суть вещественные числа, можно записать в следующем общем виде [9]:

$$\begin{aligned}
 K(x - x') = & \sum_{k=1}^{n_2} \exp(-\alpha_k^{(2)}|x - x'|) \{C_k(|x - x'|) \cos[\alpha_k^{(1)}(x - x')]\} + \\
 & + D_k(|x - x'|) \sin[\alpha_k^{(1)}|x - x'|]\} + \sum_{j=1}^{n_1} E_j(|x - x'|) \exp(-\alpha_j'|x - x'|),
 \end{aligned}$$

где $i\alpha_1', \dots, i\alpha_{n_1}'$ – чисто мнимые корни, входящие в число корней $\alpha_1, \dots, \alpha_n$;

$\alpha_1^{(1)} + i\alpha_1^{(2)}, \dots, \alpha_{n_2}^{(1)} + i\alpha_{n_2}^{(2)}$ – комплексные корни с положительной вещественной частью, входящие в число корней $\alpha_1, \dots, \alpha_n$;

$C_k(|x - x'|), D_k(|x - x'|), E_j(|x - x'|)$ – многочлены относительно $|x - x'|$, степени которых на единицу меньше кратности соответствующих корней α_j' или $\alpha_k^{(1)} + i\alpha_k^{(2)}$; при отсутствии у $S(\omega)$ кратных корней все коэффициенты C_k, D_k и E_j являются постоянными.

Вторая производная от функции математического ожидания прогибов, входящая в выражение для дисперсии поперечных сил (8), будет иметь вид:

$$\frac{d^2 < w(x, R) >}{dx^2} = \frac{1}{4B_0(R)\alpha\beta} \cdot$$

$$\cdot \left\{ \sum_{i=0}^N \int_{a_i}^{b_i} < q_i(x_i) > e^{-\alpha|x-x_i|} [\beta \cos \beta(x-x_i) - \alpha \sin \beta |x-x_i|] dx_i + \right.$$

$$\left. + \sum_{j=0}^U < P_j > e^{-\alpha|x-d_j|} [\beta \cos \beta(x-d_j) - \alpha \sin \beta |x-d_j|] \right\}, \quad x \geq 0.$$

Тогда плотность распределения поперечной силы в балке в характерном сечении x^* при любой конкретной реализации кубиковой прочности бетона будет иметь вид:

$$p_Q(Q, x^*, R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_Q(x^*, R)}} \exp \left\{ -\frac{[Q - < Q(x^*, R) >]^2}{2D_Q(x^*, R)} \right\}.$$

С учётом случайного характера нормально распределенной кубиковой прочности бетона R с плотностью $p_R(R)$ математическое ожидание и дисперсия поперечных сил в балке запишутся в виде:

$$< Q(x) > = \int_{-\infty}^{\infty} < Q(x, R) > p_R(R) dR; \quad D_Q(x) = \int_{-\infty}^{\infty} D_Q(x, R) p_R(R) dR.$$

Зная математическое ожидание и дисперсию поперечных сил в балке, можно построить его нормальное распределение в любом, в том числе в характерном сечении x^* , которое будет иметь вид:

$$p_Q(Q, x^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_Q(x^*)}} \exp \left\{ -\frac{[Q - < Q(x^*) >]^2}{2D_Q(x^*)} \right\}.$$

Вычисления интегралов, входящих в формулу (8), сводятся к вычислению интегралов от чётных дробно-рациональных функций общего вида [13]:

$$I_n = \frac{1}{2\pi i} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g_n(\omega) d\omega}{h_n(\omega) h_n(-\omega)}, \quad (9)$$

где $g_n(\theta)$ и $h_n(\theta)$ - комплексные многочлены следующего вида, где $\theta = \omega$ или $-\omega$:

$$g_n(\theta) = a_0 \theta^{2n-2} + a_1 \theta^{2n-4} + \dots + a_{n-1};$$

$$h_n(\theta) = b_0 \theta^n + b_1 \theta^{n-1} + \dots + b_n, \quad b_0 \neq 0,$$

причем в многочлен $g_n(\omega)$ входят только чётные степени ω , так как величина интеграла не зависит от нечётных степеней ω , а многочлен $h_n(\omega)$ таков, что все его корни имеют отрицательные действительные части и лежат в верхней полуплоскости, а корни многочлена $h_n(-\omega)$ лежат, соответственно, в нижней полуплоскости.

Для любого $n > 1$ интеграл (9) можно вычислить по основной теореме Коши теории вычетов [14]:

$$I_n = \frac{1}{2\pi i} \left\{ 2\pi i \sum_{\eta=1}^n \operatorname{Res}_{\omega=\omega_\eta} \left[\frac{g_n(\omega)}{h_n(\omega) h_n(-\omega)} \right] \right\}. \quad (10)$$

Учитывая голоморфность функций $g_n(\omega)$ и $h_n(\omega)$ и с учетом следующего известного равенства теории вычетов [15]:

$$\operatorname{Res}_{\omega=\omega_\eta} \frac{g_n(\omega)}{h_n(\omega)} = \frac{g_n(\omega_\eta)}{h'_n(\omega_\eta)},$$

где функция $h'_n(\omega_\eta)$ является производной по ω от полинома $h_n(\omega)$, выражение (10) будет иметь вид:

$$I_n = \sum_{\eta=1}^n \frac{g_n(\omega_\eta)}{h'_n(\omega_\eta)h_n(-\omega_\eta)} = \frac{(-1)^n}{2a_0 \prod_{l < m} (\omega_m + \omega_l)} \sum_{\eta=1}^n \frac{g_n(\omega_\eta)}{\omega_\eta h'_n(\omega_\eta)} \prod_{j < i}^{i,j \neq \eta} (\omega_i + \omega_j). \quad (11)$$

В матричной форме выражение (11) можно записать в следующем виде [16]:

$$I_n = (-1)^n \frac{N_n}{2a_0 D_n}, \quad (12)$$

где N_n – детерминант матрицы, составленной из коэффициентов многочленов $g_n(\omega)$ и $h_n(\omega)$:

$$N_n = \det \begin{bmatrix} a_0 & b_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_1 & b_2 & b_1 & 0 & \dots & 0 \\ a_2 & b_4 & b_3 & b_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n-1} & 0 & 0 & 0 & \dots & b_n \end{bmatrix},$$

здесь $b_k = 0$, если $k < 0$ или $k > n$;

D_n – определитель матрицы, составленной из коэффициентов многочлена $h_n(\omega)$:

$$D_n = \det \begin{bmatrix} b_1 & b_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ b_3 & b_2 & b_1 & b_0 & \dots & 0 \\ b_5 & b_4 & b_3 & b_2 & \dots & 0 \\ b_7 & b_6 & b_5 & b_4 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & b_n \end{bmatrix}.$$

Результаты и обсуждение

Результаты интегрирования с использованием формулы (12) для полиномов до 7 степени включительно в замкнутой форме приводятся, например, в [17].

Разрушение железобетонной балки по наклонному сечению происходит в случае, если $Q(x^*) > Q_{ult}$, где $Q_{ult} = Q_{sw}(R_{bt}, \sigma_T)$ – случайная несущая способность балки по наклонному сечению, являющаяся нормально распределенной функцией случайных величин R_{bt} и σ_T ; а $Q(x^*)$ – случайная поперечная сила в балке в характерном сечении x^* , зависящая от случайной величины прочности R и случайных функций $q(x)$, $C_1(x)$, $C_2(x)$. Характерное сечение в нашем случае будет совпадать с сечением, в котором возникает наибольшее математическое ожидание поперечной силы.

Тогда вероятность $\mathbb{P}_{Q_{ult}}$ разрушения железобетонной балки по наклонному сечению от действия случайной поперечной силы $Q(x^*)$ в характерном сечении x^* находится по формуле Ньютона-Лейбница:

$$\begin{aligned} \mathbb{P}_{Q_{ult}}(x^*) &= \int_{-\infty}^{\infty} p_{\sigma_T}(\sigma_T) \int_{-\infty}^{\infty} p_{R_{bt}}(R_{bt}) \int_{-\infty}^{\infty} p_R(R) \left[\int_{Q_{ult}(R_{bt}, \sigma_T)}^{\infty} p_Q(Q, x^*, R) dQ \right] d\sigma_T dR_{bt} dR = \\ &= \iiint_{-\infty}^{\infty} p_{\sigma_T}(\sigma_T) p_{R_{bt}}(R_{bt}) p_R(R) \left\{ 1 - \Phi \left[\frac{Q_{ult}(R_{bt}, \sigma_T) - Q(x^*, R)}{\sqrt{D_Q(x^*, R)}} \right] \right\} d\sigma_T dR_{bt} dR, \quad (13) \end{aligned}$$

где $p_{\sigma_T}(\sigma_T)$ и $p_{R_{bt}}(R_{bt})$ - функции плотностей распределений случайного предела текучести арматуры $\tilde{\sigma}_T$ и случайной прочности бетона на растяжение \tilde{R}_{bt} , соответственно;

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp(-\frac{t^2}{2}) dt - \text{интеграл вероятности Гаусса};$$

$Q_{ult}(R_{bt}, \sigma_T)$ - предельная поперечная сила, зависящая от случайных величин R_{bt} и σ_T и равная в соответствии с п. 5.2.11 [16]:

$$Q_{ult}(R_{bt}, \sigma_T) = Q_{sw}(R_{bt}, \sigma_T) = 2 \sqrt{\frac{bh_0^2 \varphi_{b2} R_{bt} \gamma_{s1} \sigma_T \varphi_{sw} A_{sw}}{S_w}} \approx 1,9 h_0 \sqrt{\frac{b A_{sw}}{S_w} R_{bt} \sigma_T}, \quad (14)$$

здесь $\varphi_{b2} = 1,5$; $\varphi_{sw} = 0,75$; $\gamma_{s1} = 0,8$; обозначения в выражении (14) приняты по [18].

Зная вероятность разрушения балки по нормальному сечению $\mathbb{P}_{M_{ult}}$ и вероятность возникновения недопустимых прогибов $\mathbb{P}_{[w]}$, полученные в [1,2], а также вероятность разрушения по наклонному сечению $\mathbb{P}_{Q_{ult}}$ (13), можно определить суммарную вероятность \mathbb{P} наступления предельных состояний в железобетонной балке как сумму вероятностей n совместных событий по формуле перекрытий (включений и исключений) теории вероятностей [19]:

$$\begin{aligned} \mathbb{P} &= \sum_{i=1}^n \mathbb{P}_i - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \mathbb{P}_i \mathbb{P}_j + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \mathbb{P}_i \mathbb{P}_j \mathbb{P}_k - \\ &- \sum_{i=1}^{n-3} \sum_{j=i+1}^{n-2} \sum_{k=j+1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n \mathbb{P}_i \mathbb{P}_j \mathbb{P}_k \mathbb{P}_l + \dots + (-1)^{n-1} \prod_{i=1}^n \mathbb{P}_i. \end{aligned}$$

В нашем случае вероятность одновременного наступления трех предельных состояний будет равна:

$$\begin{aligned} \mathbb{P} &= \mathbb{P}_{M_{ult}} + \mathbb{P}_{[w]} + \mathbb{P}_{Q_{ult}} - \mathbb{P}_{M_{ult}} \mathbb{P}_{[w]} - \mathbb{P}_{M_{ult}} \mathbb{P}_{Q_{ult}} - \mathbb{P}_{Q_{ult}} \mathbb{P}_{[w]} + \mathbb{P}_{M_{ult}} \mathbb{P}_{Q_{ult}} \mathbb{P}_{[w]} = \\ &= \mathbb{P}_{M_{ult}} + (1 - \mathbb{P}_{M_{ult}}) [\mathbb{P}_{Q_{ult}} + (1 - \mathbb{P}_{Q_{ult}}) \mathbb{P}_{[w]}]. \end{aligned}$$

Выводы

Получена оценка вероятности разрушения по наклонному сечению железобетонной балки от действия поперечной силы, а также оценка суммарной вероятности наступления трех предельных состояний железобетонной балки с вероятностными параметрами прочности, лежащей на упругом основании модели В.З. Власова - П.Л. Пастернака, обладающем стохастическими свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Деминов П.Д. К оценке статистических параметров железобетонной балки на упругом основании, имеющем стохастические характеристики // Строительство и реконструкция. 2018. № 5(79). С. 5-12.
2. Деминов П.Д. Оценка вероятности возникновения недопустимых прогибов в железобетонной балке, лежащей на стохастическом основании с двумя коэффициентами постели, под действием нестационарной случайной нагрузки // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности. 2019. № 4 (382). С. 48-54.
3. Тамразян А.Г., Дудина И.В. Влияние изменчивости контролируемых параметров на надежность преднапряженных балок на стадии изготовления. Жилищное строительство. 2001. № 1. С.16-17.
4. Тамразян А.Г. Огнеударостойкость несущих железобетонных конструкций высотных зданий. Жилищное строительство. 2005. № 1. С.7.
5. Киселев В.А. Расчет балок на упругом основании. М.: Издательство МАДИ, 1981. С. 39-40.
6. Хинчин А.Я. Теория корреляции стационарных статистических процессов // Успехи математических наук. М.: Наука, 1938. Выпуск 5. С. 42-51.
7. Раскатов С.Н. Расчет балочных и плитных свайных ростверков на упругом стохастическом основании: дис. ... канд. техн. наук. М.: МИСИ, 1976. 135 с.
8. Болотин В.В. Об упругих деформациях подземных трубопроводов, прокладываемых в статистически неоднородном грунте // Строительная механика и расчет сооружений. 1965. № 1. С. 4-8.
9. Благонядин В.Л., Кудрявцев Е.П. Статистическое исследование деформаций песчаных оснований и трубопроводов подземных волноводных линий связи // Доклады научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1964-1965 г. Секция динамики и прочности машин. М.: МЭИ, 1965. С. 78-86.
10. Яглом А.М. Корреляционная теория стационарных случайных функций с примерами из метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. С. 121-122, 129.
11. Пугачёв В.С. Теория случайных функций и её применение к задачам автоматического управления. М., Физматиздат, 1960. С. 340.
12. Миллер В.М., Панков А.Р. Теория случайных процессов в примерах и задачах. М., Физматлит, 2002. С. 308-309.
13. Булгаков Б.В. Колебания. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. С. 159-167.
14. Шабат Б.В. Введение в комплексный анализ. М.: Наука, 1976. С.130.
15. Кац А.М. К вопросу о вычислении квадратичного критерия качества регулирования // Прикладная математика и механика. 1952. Т. XVI. Вып. 3. С. 362-364.
16. Теория следящих систем / под ред. Джеймс Х.М., Никольс Н.Б., Филлипс Р.С. М.: Иностранная литература, 1953. С. 411-418, 454-456.
17. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003. М.: Стандартинформ, 2019.
18. СП 52-101-2003 Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. М.: 2004.
19. Крицкий О.Л., Михальчук А.А., Трифонов А.Ю., Шинкеев М.Л. Теория вероятностей и математическая статистика для технических университетов. Ч. I. Теория вероятностей: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. С.16-17.

REFERENCES

1. Deminov P.D. K otsenke statisticheskikh parametrov zhelezobetonnoy balki na uprugom osnovanii, imeyushchem stokhasticheskiye kharakteristiki [To the assessment of the statistical parameters of a reinforced concrete beam on an elastic foundation with stochastic characteristics]. Building and reconstruction. 2018. No. 5 (79). Pp.5-12.
2. Deminov P.D. Otsenka veroyatnosti vozniknoveniya nedopustimyykh progibov v zhelezobetonnoy balke, lezhashchey na stokhasticheskom osnovanii s dvumya koeffitsiyentami posteli, pod deystviyem nestatsionarnoy sluchaynoy nagruzki [Estimation of the probability of occurrence of unacceptable deflections in a reinforced concrete beam lying on a stochastic foundation with two bed coefficients under the action of a non-stationary random load]. Izvestiya VUZov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. 2019, No. 4 (382). Pp. 48-54.
3. Tamrazyan A.G., Dudina I.V. Vliyaniye izmenchivosti kontroliruyemykh parametrov na nadezhnost' prednapryazhennykh balok na stadii izgotovleniya [Influence of variability of controlled parameters on the reliability of prestressed beams at the manufacturing stage]. Zhilishchnoe stroitelstvo. 2001. No. 1. P.16-17.

4. Tamrazyan A.G. Ogneudarostoykost' nesushchikh zhelezobetonnykh konstruktсий vysoknykh zdaniy [Fire resistance of load-bearing reinforced concrete structures of high-rise buildings]. Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2005. No. 1. Pp. 7.
5. Kiselev V.A. Raschet balok na uprugom osnovanii [Calculation of beams on an elastic foundation]. Moscow: MADI Publishing House, 1981. Pp. 39-40.
6. Khinchin A.Ya. Teoriya korrelyatsii statsionarnykh statisticheskikh protsessov [Correlation theory of stationary statistical processes] // Uspekhi Matematicheskikh Nauk. 1938. Issue 5. Pp. 42-51.
7. Raskatov S.N. Raschet balochnykh i plitnykh svaynykh rostverkov na uprugom stokhasticheskom osnovanii [Calculation of beam and slab pile grillages on an elastic stochastic foundation]: dis. ... Cand. tech. sciences. Moscow.: MISI, 1976. 135 p.
8. Bolotin V.V. Ob uprugikh deformatsiyakh podzemnykh truboprovodov, prokladyvayemykh v statisticheski neodnorodnom grunte [On elastic deformations of underground pipelines laid in statistically heterogeneous soil // Structural mechanics and calculation of structures]. 1965. No. 1. Pp. 4-8.
9. Blagonadezhin V.L., Kudryavtsev E.P. Statisticheskoye issledovaniye deformatsiy peschanykh osnovaniy i truboprovodov podzemnykh volnovodnykh liniy svyazi [Statistical study of deformations of sandy foundations and pipelines of underground waveguide communication lines]. Reports of a scientific and technical conference on the results of research work for 1964-1965, Section of dynamics and strength of machines. Moscow: MEI, 1965. Pp. 78-86.
10. Yaglom A.M. Korrelyatsionnaya teoriya statsionarnykh sluchaynykh funktsiy s primerami iz meteorologii [Correlation theory of stationary random functions with examples from meteorology]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981. Pp. 121-122, 129.
11. Pugachev V.S. Teoriya sluchaynykh funktsiy i yeyo primeneniye k zadacham avtomaticheskogo upravleniya [The theory of random functions and its application to automatic control problems]. – Moscow: Fizmatizdat, 1960. 340 p.
12. Miller V.M., Pankov A.R. Teoriya sluchaynykh protsessov v primerakh i zadachakh [Theory of stochastic processes in examples and problems]. Moscow: Fizmatlit, 2002. Pp. 308-309.
13. Bulgakov B.V. Kolebaniya [Vibrations]. Moscow: State publishing house of technical and theoretical literature, 1954. Pp. 159-167.
14. Shabat B.V. Vvedeniye v kompleksnyy analiz [Introduction to complex analysis]. Moscow: Nauka, 1976. P.130.
15. Katz A.M. K voprosu o vychislenii kvadrachnogo kriteriya kachestva regulirovaniya [On the issue of calculating the quadratic quality criterion of regulation] // Applied Mathematics and Mechanics. 1952. T. XVI. Issue. 3. Pp. 362-364.
16. James H.M., Nichols N.B., Phillips R.S. et al. Teoriya sledyashchikh system [The theory of tracking systems]. Moscow: Inostrannaya literatura, 1953. Pp. 411-418, 454-456.
17. Building Code of RF SP 63.13330.2018. Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruktсии. Osnovnyye polozheniya. SNiP 52-01-2003 [Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. SNiP 52-01-2003]. – Moscow: Standartinform, 2019.
18. Building Code of RF SP 52-101-2003. Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruktсии bez predvaritel'nogo napryazheniya armatury [Concrete and reinforced concrete structures without prestressing reinforcement]. Moscow, 2004.
19. Kritskiy O.L., Mikhalechuk A.A., Trifonov A.Yu., Shinkeev M.L. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika dlya tekhnicheskikh universitetov. Ch. I. Teoriya veroyatnostey [Probability theory and mathematical statistics for technical universities. Part I. Probability theory]. Tomsk: Publishing house of the Tomsk Polytechnic University, 2010. Pp.16-17.

Информация об авторе:

Демин Павел Дмитриевич

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: p-deminov@mail.ru

Information about the author:

Deminov Pavel D.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.

E-mail: p-deminov@mail.ru

О.В. РАДАЙКИН¹, Л.С. САБИТОВ², Л.Ш. АХТЯМОВА³, Т.П. АРАКЧЕЕВ²

¹ООО Инженерный центр «Энергопрогресс», г. Казань, Россия,

²ФБГОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Россия,

³ФБГОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону, Россия

ОБЩИЙ СЛУЧАЙ РАСЧЁТА СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ АРМИРОВАННОГО БЕТОНА ДИАГРАММНЫМ МЕТОДОМ

Аннотация. В СП 63.13330 общим расчётным случаем для диаграммного метода является косо внецентренное сжатие, при котором учитывается только три компонента внутренних силовых факторов в сечении: продольная сила – N_z – и два изгибающих момента относительно соответствующих осей – M_x и M_y . Остальные три компонента – перерезывающие силы Q_x и Q_y и крутящий момент M_z – остаются вне рассмотрения. Кроме того, для этого случая поиск в доступной литературе, в том числе у основоположников диаграммного метода, вывода расчётных формул не увенчался успехом – во всех источниках они приводятся уже в готовом виде без доказательств. Попытаться восполнить эти пробелы призвана данная статья. Для этого, основываясь на общепринятых в механике выражениях для перемещений стержня, в частности на интеграле перемещений Мора, получены разрешающие выражения диаграммного метода в самом общем виде.

Ключевые слова: армированный бетон, нелинейная деформационная модель, диаграммный метод, диаграммы деформирования.

O.V. RADAYKIN¹, L.S. SABITOV², L.SH. AKHTYAMOVA³, T.P. ARAKCHEEV²

¹Energoprogress Engineering center LLC, Kazan, Russia,

²Kazan state power engineering University, Kazan, Russia,

³Don state technical University, Rostov-on-Don, Russia

GENERAL CASE OF REINFORCED CONCRETE ROD ELEMENTS CALCULATION USING THE DIAGRAM METHOD

Abstract. In SP 63.13330 the general calculation case for the diagram method is oblique off-center compression, which takes into account only three components of internal force factors in the cross section: the longitudinal force- N_z – and two bending moments relative to the corresponding axes – M_x and M_y . The other three components-the Q_x and Q_y transfer forces and the M_z torque – are left out of consideration. In addition, for this case, the search in the available literature, including the founders of the diagram method, for the output of calculation formulas was not successful – in all sources they are given in ready-made form without evidence. This article is intended to try to fill in these gaps. For this purpose, based on the expressions for rod displacements that are generally accepted in mechanics, in particular on the Mora integral of displacements, the resolving expressions of the diagram method are obtained in the most general form.

Keywords: reinforced concrete, nonlinear deformation model, diagram method, deformation diagrams.

Введение

В СП 63.13330 альтернативно методу предельных усилий для расчёта стержневых железобетонных элементов включён также и диаграммный метод. Его отличительная особенность заключается в возможности расчёта по обеим группам предельных состояний проводить по единым формулам, а также получать напряжённо-деформированное состояние

(НДС) рассматриваемых элементов на всех этапах нагружения: от нуля и до разрушения. В указанном своде правил общим расчётным случаем по данному методу является косоое внецентренное сжатие, при котором учитывает только три компоненты внутренних силовых факторов в сечении: продольная сила – N_z – и два изгибающих момента относительно соответствующих осей – M_x и M_y . Остальные три компоненты – перерезывающие силы Q_x и Q_y и крутящий момент M_z – остаются вне рассмотрения. Кроме того, для косоого внецентренного сжатия поиск в доступной литературе, в том числе у основоположников диаграммного метода [1]-[3], вывода расчётных формул не увенчался успехом – во всех источниках они приводятся уже в готовом виде без доказательств. Попытаться восполнить эти пробелы призвана данная статья.

Модели и методы

В частном случае косоого внецентренного сжатия разрешающие уравнения для стержня, показанного на рисунок 1а, известны. Например, в [4] приведены такие выражения:

$$\begin{Bmatrix} N_z \\ M_x \\ M_y \end{Bmatrix} = E \begin{bmatrix} A & -S_x & S_y \\ -S_x & I_x & -I_{xy} \\ S_y & -I_{xy} & I_y \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \chi_x \\ \chi_y \end{Bmatrix} = [D] \times \begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \chi_x \\ \chi_y \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где ε_z – продольные относительные деформации стержня; χ_x, χ_y – кривизны продольной оси стержня относительно соответствующих осей; E – модуль деформаций материала; $A, S_x, S_y, I_x, I_y, I_{xy}$ – геометрические характеристики сечения: площадь, статические моменты, моменты инерции, центробежный момент инерции.

Если принятые оси координат совпадают с главными центральными, то равны нулю статические моменты S_x, S_y и центробежный момент инерции I_{xy} , а матрица жёсткости $[D]$ превращается в диагональную.

Для железобетонного сечения формулу (1) можно переписать так:

$$\begin{Bmatrix} N_z \\ M_y \\ M_x \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & -D_{12} & D_{13} \\ -D_{21} & D_{22} & -D_{23} \\ D_{31} & -D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \chi_x \\ \chi_y \end{Bmatrix} = [D] \times \begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \chi_x \\ \chi_y \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

где для сечения, показанного на рисунке 1б компоненты матрицы жёсткости равны:

$$\begin{aligned} D_{11} &= \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} v_{b,ij} E_{b,ij} A_{b,ij} + \sum_{k=1}^p v_{s,k} E_{s,k} A_{s,k}, \\ D_{12} = D_{21} &= \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} v_{b,ij} E_{b,ij} A_{b,ij} y_{bi} + \sum_{k=1}^p v_{s,k} E_{s,k} A_{s,k} y_{s,k}, \\ D_{13} = D_{31} &= \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} v_{b,ij} E_{b,ij} A_{b,ij} x_{bi} + \sum_{k=1}^p v_{s,k} E_{s,k} A_{s,k} x_{s,k}, \\ D_{22} &= \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} v_{b,ij} E_{b,ij} A_{b,ij} y_{bi}^2 + \sum_{k=1}^p v_{s,k} E_{s,k} A_{s,k} y_{s,k}^2, \\ D_{23} = D_{32} &= \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} v_{b,ij} E_{b,ij} A_{b,ij} x_{bi} y_{bi} + \sum_{k=1}^p v_{s,k} E_{s,k} A_{s,k} x_{s,k} y_{s,k}, \\ D_{33} &= \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} v_{b,ij} E_{b,ij} A_{b,ij} x_{bi}^2 + \sum_{k=1}^p v_{s,k} E_{s,k} A_{s,k} x_{s,k}^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где ν_b , ν_s – коэффициенты секущего модуля деформации (по Карпенко Н.И.) или коэффициенты упруго-пластических деформаций (по Мурашёву В.И.) соответственно бетона и арматуры; остальные величины (геометрические) понятны из рисунка 1б.

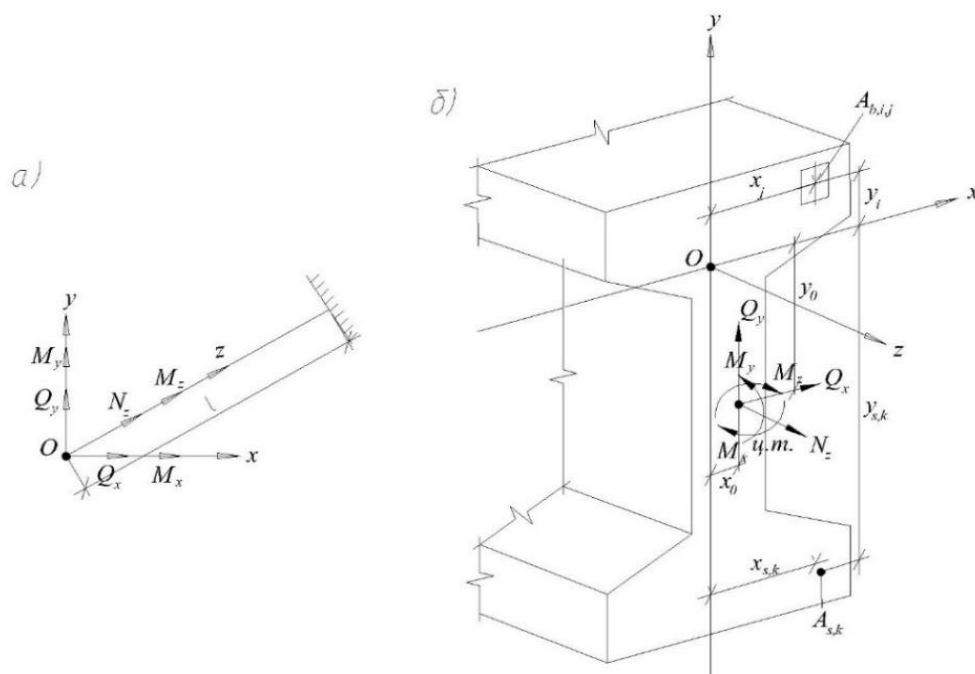


Рисунок 1 - Расчётная схема: а – стержня; б – поперечного сечения

Сравнивая полученные выражения с формулами (8.39)-(8.47) СП 63.13330, находим много схожего.

Отличие свода правил заключается, во-первых, в повороте осей координат Oxy относительно оси Oz на 90^0 по часовой стрелке, во-вторых, в полном отсутствии знаков «минус» в матрице жёсткости, что связано, видимо, с поворотом осей. Третье отличие заключается в индексации изгибающих моментов: в данной статье используется общепринятое в сопротивлении материалов – нижний индекс у момента обозначает координатную ось, относительно которой происходит вращение (например, момент M_x вызывает вращение относительно оси Ox); в СП 63.13330 – иначе: нижний индекс у момента обозначает координатную ось, вдоль которой действует момент. При этом, хотя в СП и конкретизируется плоскость, в которой действует тот или иной момент, но без этого уточнения вращение может происходить относительно любой из двух оставшихся осей, что вызывает путаницу. Поэтому в своих работах мы используем общепринятые в сопротивлении материалов и строительной механике обозначения.

Решением системы уравнений (2) будет:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \chi_x \\ \chi_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & -D_{12} & D_{13} \\ -D_{21} & D_{22} & -D_{23} \\ D_{31} & -D_{32} & D_{33} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{Bmatrix} N_z \\ M_y \\ M_x \end{Bmatrix} = [D]^{-1} \times \begin{Bmatrix} N_z \\ M_y \\ M_x \end{Bmatrix},$$

Для вывода общего случая расчёта стержня (рисунок 1а) диаграммным методом запишем интеграл перемещений Мора [4]:

$$\Delta_{1P} = \int_0^l \left(\frac{\bar{N}_{z1} N_{zP}}{D_z} + \frac{\bar{M}_{x1} M_{xP}}{D_x} + \frac{\bar{M}_{y1} M_{yP}}{D_y} + \frac{\bar{M}_{z1} M_{zP}}{D_k} + k_x \frac{\bar{Q}_{x1} Q_{xP}}{D_Q} + k_y \frac{\bar{Q}_{y1} Q_{yP}}{D_Q} \right) dz.$$

Формулы справедливы, если в полюсе O стержня положена правая система координат $Oxyz$: ось z – вдоль стержня, ось x – из плоскости чертежа, ось y – вверх. Причём оси являются главными центральными. Положительным направлением для моментов и углов поворота является направление против часовой стрелки, если смотреть с положительного конца данной оси. Для компактности моменты и углы поворота обозначены как спин-векторы.

Рассмотрим каждое из шести перемещений отдельно. Так при действии $\bar{N}_{z1} = 1$ и N_z (остальные силовые факторы равны нулю), пользуясь правилом перемножения эпюр, получим перемещение вдоль оси Oz : $u_z = \int_0^l \frac{N_z}{D_z} dz$. Поворот полюса O стержня относительно

оси Ox на угол φ_x возможен как от действия моментов $\bar{M}_{x1} = 1$, M_x – они вызовут перемещение $\varphi_{x1} = \int_0^l \frac{M_x}{D_x} dz$, так и от действия перерезывающих сил $\bar{Q}_{y1} = 1$, Q_y , которые

создают момент равный $Q_y z$ и соответствующее перемещение $\varphi_{x2} = - \int_0^l \frac{Q_y z}{D_x} dz$. Тогда

$\varphi_x = \varphi_{x1} + \varphi_{x2} = \int_0^l \frac{M_x}{D_x} dz - \int_0^l \frac{Q_y z}{D_x} dz$. Остальные компоненты перемещений получим по аналогии:

$$\begin{aligned} u_z &= \int_0^l \frac{N_z}{D_z} dz, \quad \varphi_x = \int_0^l \frac{M_x}{D_x} dz - \int_0^l \frac{Q_y z}{D_x} dz, \quad \varphi_y = \int_0^l \frac{M_y}{D_y} dz + \int_0^l \frac{Q_x z}{D_y} dz, \quad \varphi_z = \int_0^l \frac{M_z}{D_k} dz, \\ u_x &= \int_0^l k_x \frac{Q_x}{D_Q} dz + \int_0^l \frac{Q_x z^2}{D_y} dz + \int_0^l \frac{M_y z}{D_y} dz, \quad u_y = \int_0^l k_y \frac{Q_y}{D_Q} dz + \int_0^l \frac{Q_y z^2}{D_x} dz - \int_0^l \frac{M_x z}{D_x} dz, \end{aligned} \quad (4)$$

где D_z – осевая жёсткость стержня, D_x , D_y – изгибные, D_Q – сдвиговая, D_k – крутильная; l – длина стержня; k_x , k_y – коэффициенты формы при сдвиге (для прямоугольного сечения $k_x = k_y = 1,2$).

О жёсткостях подробнее речь пойдёт в конце статьи.

Для отыскания коэффициентов формы при сдвиге применяют следующие выражения (армирование пренебрегается):

$$k_x = \frac{A_b}{I_{by} A_b} \int \frac{S_{by}^{omc} dA_b}{b^2}, \quad k_y = \frac{A_b}{I_{bx} A_b} \int \frac{S_{bx}^{omc} dA_b}{b^2},$$

где A_b – площадь бетонного сечения;

b – ширина бетонного сечения;

I_{bx} , I_{by} – моменты инерции бетонного сечения относительно осей Ox и Oy ;

S_{bx}^{omc} , S_{by}^{omc} – статические моменты отсечённой части бетонного сечения относительно соответствующих осей.

Вектор сил, приложенный в полюсе O стержня, запишем в виде:

$$\{P\}^T = \{N_z \quad Q_x \quad Q_y \quad M_z \quad M_x \quad M_y\}^T,$$

соответствующий вектор перемещений:

$$\{u\}^T = \{u_z \quad u_x \quad u_y \quad \varphi_z \quad \varphi_x \quad \varphi_y\}^T.$$

Результаты исследования и их анализ

В выражениях (4) продифференцируем по координате z линейные перемещения u_z

один раз: $\frac{\partial u_z}{\partial z} = \varepsilon_z$, линейные перемещения u_x, u_y – дважды: $\frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} = \chi_x$, $\frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} = \chi_y$, углы

поворота $\varphi_z, \varphi_x, \varphi_y$ – один раз: $\frac{\partial \varphi_z}{\partial z} = \theta_z$, $\frac{\partial \varphi_x}{\partial z} = \chi_x$, $\frac{\partial \varphi_y}{\partial z} = \chi_y$, где θ_z – относительный угол закручивания относительно оси Oz .

Теперь получим:

$$\varepsilon_z = \frac{N_z}{D_z}, \quad \chi_x = k_y \frac{q_y}{D_Q} + \frac{q_y z^2}{D_x} + \frac{2Q_y z}{D_x} - \frac{Q_y z}{D_x} - \frac{M_x}{D_x} = q_y \left(\frac{k_y}{D_Q} + \frac{z^2}{D_x} \right) + \frac{Q_y z}{D_x} - \frac{M_x}{D_x},$$

$$\chi_y = k_x \frac{q_x}{D_Q} + \frac{q_x z^2}{D_y} + \frac{2Q_x z}{D_y} + \frac{Q_x z}{D_y} + \frac{M_y}{D_y} = q_x \left(\frac{k_x}{D_Q} + \frac{z^2}{D_y} \right) + \frac{3Q_x z}{D_y} + \frac{M_y}{D_y},$$

$$\theta_z = \frac{M_z}{D_k}, \quad \chi_x = -\frac{Q_y z}{D_x} + \frac{M_x}{D_x}, \quad \chi_y = \frac{Q_x z}{D_y} + \frac{M_y}{D_y}.$$

В этих формулах сделаем замену: $Q_y z = -M_x$, $Q_x z = M_y$, тогда будем иметь:

$$\begin{aligned} \varepsilon_z &= \frac{N_z}{D_z}, \quad \chi_x = q_y \left(\frac{k_y}{D_Q} + \frac{z^2}{D_x} \right) - \frac{2M_x}{D_x}, \quad \chi_y = q_x \left(\frac{k_x}{D_Q} + \frac{z^2}{D_y} \right) + \frac{4M_y}{D_y}, \\ \theta_z &= \frac{M_z}{D_k}, \quad \chi_x = -\frac{M_y}{D_x} + \frac{M_x}{D_x}, \quad \chi_y = \frac{M_x}{D_y} + \frac{M_y}{D_y}. \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнения 2,3 и соответственно 5,6 в формулах (5) являются тождественными – определяющими одну и ту же величину, поэтому отбросим, например, 2 и 3. Получим следующую систему уравнений:

$$\varepsilon_z = \frac{N_z}{D_z}, \quad \theta_z = \frac{M_z}{D_k}, \quad \chi_x = \frac{M_x - M_y}{D_x}, \quad \chi_y = \frac{M_y + M_x}{D_y}. \quad (6)$$

Или в матричном виде:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \theta_z \\ \chi_x \\ \chi_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{D_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{D_k} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{D_x} & -\frac{1}{D_x} \\ 0 & 0 & \frac{1}{D_y} & \frac{1}{D_y} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} N_z \\ M_z \\ M_x \\ M_y \end{Bmatrix},$$

Полученные выражения не содержат прирезающих сил и сдвиги учитывают в неявном виде. Чтобы учесть их явно, необходимо в формулах (5) отбросить два последних выражения и положить $z=l$, $q_x = \frac{3Q_x}{8l} \dots \frac{5Q_x}{8l} \approx \frac{2Q_x}{l}$, $q_y = \frac{3Q_y}{8l} \dots \frac{5Q_y}{8l} \approx \frac{2Q_y}{l}$.

Тогда (5) предстанут в виде:

$$\varepsilon_z = \frac{N_z}{D_z}, \theta_z = \frac{M_z}{D_k}, \chi_x = 2Q_y \left(\frac{k_y}{D_Q l} + \frac{l}{D_x} \right) - \frac{2M_x}{D_x}, \chi_y = 2Q_x \left(\frac{k_x}{D_Q l} + \frac{l}{D_y} \right) + \frac{4M_y}{D_y}. \quad (7)$$

Или в матричном виде:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \theta_z \\ \chi_x \\ \chi_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{D_z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{D_z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2k_y}{D_Q l} + \frac{2l}{D_x} & 0 & -\frac{2}{D_x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2k_x}{D_Q l} + \frac{2l}{D_y} & 0 & \frac{4}{D_y} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} N_z \\ Q_x \\ Q_y \\ M_z \\ M_x \\ M_y \end{Bmatrix}. \quad (8)$$

Отметим, что в выражениях (7) и (8) хотя и учтены перерезывающие усилия, однако в векторе деформаций сдвиговые деформации γ отсутствуют, они учитываются косвенно через сдвиговую жёсткость D_Q , которая зависит от τ и γ .

Также отметим, что в структуре формул для кривизн первое слагаемое отвечает за влияние на кривизну деформаций чистого сдвига, второе слагаемое – изгибных деформаций, вызванных перерезывающей силой, третье слагаемое – изгибных деформаций, вызванных действием момента.

Кроме того, предлагаемый подход несёт в себе перспективы развития за счёт учёта помимо продольных деформаций ε_z также и поперечных деформаций ε_x и ε_y . Возможные варианты таких уточнений приведены в работах [5], [6], [7].

До этого вывод всех формул осуществлялся относительно главных центральных осей стержня. При произвольном выборе системы координат $O'x'y'z'$ в жесткостные характеристики сечения необходимо внести корректировки на основе следующих рассуждений (рисунок 1б). Относительно главных центральных осей продольная сила не имеет эксцентриситета, $a_x=a_y=0$, а центробежный момент инерции и соответствующая центробежная жёсткость сечения стержня равны нулю: $I_{xy} = I_{bxy} + I_{sxy} = 0$, $D_{xy} = 0$. Последняя величина определяется по последнему выражению из формул (3): $D_{xy} = D_{33}$.

Равны нулю также статические моменты относительно осей Ox и Oy и соответствующие им статические жёсткости: $S_x = S_{bx} + S_{sx} = 0$ и $S_y = S_{by} + S_{sy} = 0$, $D_{Sx} = 0$ и $D_{Sy} = 0$. Указанные жёсткости определяются по выражениям 2 и 3 формул (3): $D_{Sx} = D_{12} = D_{21}$, $D_{Sy} = D_{13} = D_{31}$.

При произвольном задании системы координат необходимо учесть дополнительные деформации поворота сечения, вызванные внецентренно приложенной продольной силой N_z , а также дополнительные повороты от M_x относительно оси Oy и от M_y относительно оси Ox . Это достигается путём включения в первое выражение формул (6) или (7) относительных

деформаций, вызванных изгибом: $\varepsilon_z = \varepsilon_0 + \chi_y x - \chi_x y$, где $\varepsilon_0 = \frac{N_z}{D_z}$. И, кроме того, необходимо выполнить замену изгибных жесткостей на следующие величины:

$$D_x = \frac{D'_x + D'_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(D'_x - D'_y)^2 + 4D'_{xy}} - \frac{D'^2_{Sx}}{D'_z},$$

$$D_y = \frac{D'_x + D'_y}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(D'_x - D'_y)^2 + 4D'_{xy}} - \frac{D'^2_{Sy}}{D'_z},$$

где штрих «'» – означает, что данная величина вычислена относительно произвольных осей $O'x'y'z'$.

При этом $D_z = D'_z$, $D_Q = D'_Q$ и $D_k = D'_k$.

Также необходимо выполнить замену изгибающих моментов и перерезывающих сил на:

$$M_x = \frac{(M'_x + N'_z a_y) \cos(\alpha_{0M} - \alpha)}{\cos \alpha_{0M}} = \frac{N'_z (e'_y + a_y) \cos(\alpha_{0M} - \alpha)}{\cos \alpha_{0M}} = \frac{N'_z e_y \cos(\alpha_{0M} - \alpha)}{\cos \alpha_{0M}},$$

$$M_y = \frac{(M'_y + N'_z a_x) \sin(\alpha_{0M} - \alpha)}{\sin \alpha_{0M}} = \frac{N'_z (e'_x + a_x) \sin(\alpha_{0M} - \alpha)}{\sin \alpha_{0M}} = \frac{N'_z e_x \sin(\alpha_{0M} - \alpha)}{\sin \alpha_{0M}},$$

$$Q_x = \frac{Q'_x \cos(\alpha_{0Q} - \alpha)}{\cos \alpha_{0Q}}, \quad Q_y = \frac{Q'_y \sin(\alpha_{0Q} - \alpha)}{\sin \alpha_{0Q}},$$

где a_x, a_y – расстояния между соответствующими осями $O'x'y'$ и Oxy (принимаются со своим знаком относительно осей Oxy); $e'_y = \frac{M'_x}{N'_z}$, $e'_x = \frac{M'_y}{N'_z}$ – проекции на оси $O'x'y'$ эксцентриситета

приложения продольной силы относительно центра O' ; $e_y = \frac{M_x}{N_z}$, $e_x = \frac{M_y}{N_z}$ – проекции на оси Oxy эксцентриситета приложения продольной силы относительно центра O ;

$\alpha = \frac{1}{2} \arctg \left(-\frac{2D'_{xy}}{D'_x - D'_y} \right)$ – угол поворота осей $O'x'y'$ относительно осей Oxy ; $\alpha_{0M} = \arctg \left(\frac{M'_y}{M'_x} \right)$

$\alpha_{0Q} = \arctg \left(\frac{Q'_y}{Q'_x} \right)$ – углы между соответственно вектором M' и Q' и горизонтальной осью $O'x'$.

Обозначим для краткости $C_M = \frac{\cos(\alpha_{0M} - \alpha)}{\cos \alpha_{0M}}$, $S_M = \frac{\sin(\alpha_{0M} - \alpha)}{\sin \alpha_{0M}}$, $C_Q = \frac{\cos(\alpha_{0Q} - \alpha)}{\cos \alpha_{0Q}}$,

$$S_Q = \frac{\sin(\alpha_{0Q} - \alpha)}{\sin \alpha_{0Q}}.$$

Таким образом для формул (6) будем иметь:

$$\varepsilon_z = \frac{N_z}{D_z} + \chi_y x - \chi_x y, \quad \theta_z = \frac{M_z}{D_k}, \quad \chi_x = \frac{N_z (-e'_x - a_x + e'_y + a_y) C_M}{\frac{D'_x + D'_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(D'_x - D'_y)^2 + 4D'_{xy}} - \frac{D'^2_{Sx}}{D'_z}},$$

$$\chi_y = \frac{N_z (e'_x + a_x + e'_y + a_y) S_M}{\frac{D'_x + D'_y}{2} \mp \frac{1}{2} \sqrt{(D'_x - D'_y)^2 + 4D'_{xy}} - \frac{D'^2_{Sy}}{D'_z}}. \quad (9)$$

А формулы (14) перепишем так:

$$\begin{aligned}\varepsilon_z &= \frac{N_z}{D_z} + \chi_y x - \chi_x y, \quad \theta_z = \frac{M_z}{D_k}, \\ \chi_x &= \frac{2Q_y C_Q k_y}{D_Q l} + \frac{2Q_y C_Q l - 2N_z (e'_y + a_y) C_M}{\frac{D'_x + D'_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(D'_x - D'_y)^2 + 4D'_{xy}} - \frac{D_{Sx}^{\prime 2}}{D_z}}, \\ \chi_y &= \frac{2Q_x S_Q k_x}{D_Q l} + \frac{2Q_x S_Q l + 4N_z (e'_x + a_x) S_M}{\frac{D'_x + D'_y}{2} \mp \frac{1}{2} \sqrt{(D'_x - D'_y)^2 + 4D'_{xy}} - \frac{D_{Sy}^{\prime 2}}{D_z}}.\end{aligned}\quad (10)$$

Рассмотрим частный случай, когда угол $\alpha=0$, то есть оси $O'x'y'$ параллельны Ox . Это означает, что $\cos \alpha = 1$, $D'_{xy} = 0$, тогда для (9) будем иметь:

$$\begin{aligned}\varepsilon_z &= \frac{N_z}{D_z} + \chi_y x - \chi_x y, \quad \theta_z = \frac{M_z}{D_k}, \quad \chi_x = \frac{N_z (-e'_x - a_x + e'_y + a_y)}{D'_x - \frac{D_{Sx}^{\prime 2}}{D_z}}, \\ \chi_y &= \frac{N_z (e'_x + a_x + e'_y + a_y)}{D'_y - \frac{D_{Sy}^{\prime 2}}{D_z}}.\end{aligned}\quad (11)$$

А для (10):

$$\begin{aligned}\varepsilon_z &= \frac{N_z}{D_z} + \chi_y x - \chi_x y, \quad \theta_z = \frac{M_z}{D_k}, \quad \chi_x = \frac{2Q_y k_y}{D_Q l} + \frac{2Q_y l - 2N_z (e'_y + a_y)}{D'_x - \frac{D_{Sx}^{\prime 2}}{D_z}}, \\ \chi_y &= \frac{2Q_x k_x}{D_Q l} + \frac{2Q_x l + 4N_z (e'_x + a_x)}{D'_y - \frac{D_{Sy}^{\prime 2}}{D_z}}.\end{aligned}\quad (12)$$

Если оси $O'x'y'$ теперь перенести в центр тяжести сечения, то $D'_{Sx} = 0$, $D'_{Sy} = 0$, $a_x = 0$, $a_y = 0$, $e'_x = e_x$, $e'_y = e_y$, $D'_x = D_x$, $D'_y = D_y$, $\varepsilon_z = \varepsilon_0$ тогда приходим к формулам (6) и (7).

Отметим, что выражения (6), (7), (9)-(12) получены впервые.

Дополним их граничными условиями в форме деформационных критериев наступления того или иного предельного состояния. Так, образование трещин в элементе наступает при достижении в наиболее растянутом бетонном волокне предельных деформаций:

$$\varepsilon_{bt}^{\max} = \varepsilon_{bt2}.$$

При разрушении элемента возможны три случая:

$$\varepsilon_b^{\max} = \varepsilon_{b2} - \text{хрупкое разрушение,}$$

$$\varepsilon_s^{\max} = \varepsilon_{s0} - \text{«пластичное» разрушение,}$$

$$\varepsilon_b^{\max} = \varepsilon_{b2} \text{ U } \varepsilon_s^{\max} = \varepsilon_{s0} - \text{разрушение оптимального сечения.}$$

Перечислим преимущества предлагаемого подхода:

1 – рассматриваются все шесть компонент внешних силовых факторов, действующих на стержневой элемент (в СП 63.13330 их только три: N_z , M_x , M_y): у главного вектора сил R – три (N_z , Q_x , Q_y), у главного момента M – три (M_x , M_y , M_z);

2 – в расчётах учтена работа растянутой зоны бетона над трещиной;

3 – для описания взаимосвязи между напряжениями и деформациями бетона помимо диаграмм деформирования на одноосное растяжение/сжатие используются диаграммы сдвига « τ - γ » [8], [9]. Благодаря этому возникает возможность рассчитывать сечения изгибаемых элементов в зоне совместного действия M и Q на основе диаграммного метода.

Предложенный подход распространим на более широкий класс конструктивных стержневых элементов из армированного бетона. Для этого запишем формулы для определения жесткостей в самом общем виде:

$$\begin{aligned} D_z &= \sum \sum v_b E_b A_b + \sum \sum k_{b,ad} v_{b,ad} E_{b,ad} A_{b,ad} + \sum k_s v_s E_s A_s + \\ &+ \sum k_{s,ad} v_{s,ad} E_{s,ad} A_{s,ad} + \sum \sum k_{r1} v_{s,r1} E_{s,r1} A_{s,r1} + \sum \sum k_{r2} v_{s,r2} E_{s,r2} A_{s,r2}, \\ D_x &= \sum \sum v_b E_b I_{bx} + \sum \sum k_{b,ad} v_{b,ad} E_{b,ad} I_{bx,ad} + \sum k_s v_s E_s I_{sx} + \\ &+ \sum k_{s,ad} v_{s,ad} E_{s,ad} I_{sx,ad} + \sum \sum k_{r1} v_{s,r1} E_{s,r1} I_{sx,r1} + \sum \sum k_{r2} v_{s,r2} E_{s,r2} I_{sx,r2}, \\ D_y &= \sum \sum v_b E_b I_{by} + \sum \sum k_{b,ad} v_{b,ad} E_{b,ad} I_{by,ad} + \sum k_s v_s E_s I_{sy} + \\ &+ \sum k_{s,ad} v_{s,ad} E_{s,ad} I_{sy,ad} + \sum \sum k_{r1} v_{s,r1} E_{s,r1} I_{sy,r1} + \sum \sum k_{r2} v_{s,r2} E_{s,r2} I_{sy,r2}, \\ D_k &= \sum \sum v_b G_b I_{bk} + \sum \sum k_{b,ad} v_{b,ad} G_{b,ad} I_{bk,ad} + \sum k_s v_s G_s I_{sk} + \\ &+ \sum k_{s,ad} v_{s,ad} G_{s,ad} I_{sk,ad} + \sum \sum k_{r1} v_{s,r1} G_{s,r1} I_{sk,r1} + \sum \sum k_{r2} v_{s,r2} G_{s,r2} I_{sk,r2}, \\ D_Q &= \sum \sum v_b G_b A_b + \sum \sum k_{b,ad} v_{b,ad} G_{b,ad} A_{b,ad} + \sum k_s v_s G_s A_s + \\ &+ \sum k_{s,ad} v_{s,ad} G_{s,ad} A_{s,ad} + \sum \sum k_{r1} v_{s,r1} G_{s,r1} A_{s,r1} + \sum \sum k_{r2} v_{s,r2} G_{s,r2} A_{s,r2}, \end{aligned}$$

где E_b , $E_{b,ad}$, E_s , $E_{s,ad}$, $E_{s,r1}$, $E_{s,r2}$ и G_b , $G_{b,ad}$, G_s , $G_{s,ad}$, $G_{s,r1}$, $G_{s,r2}$ – начальные модули деформаций и модули сдвига соответственно основного бетона, добавленного бетона усиления, основной гибкой стержневой арматуры, добавленной гибкой стержневой арматуры усиления, жёсткой центральной арматуры (стального ядра), жёсткой внешней стальной арматуры (трубной оболочки); A_b , $A_{b,ad}$, A_s , $A_{s,ad}$, $A_{s,r1}$, $A_{s,r2}$ – площади соответствующих компонент сечения; I_{bx} , $I_{bx,ad}$, I_{sx} , $I_{sx,ad}$, $I_{sx,r1}$, $I_{sx,r2}$ и I_{by} , $I_{by,ad}$, I_{sy} , $I_{sy,ad}$, $I_{sy,r1}$, $I_{sy,r2}$ – моменты инерции соответствующих компонент сечения относительно осей Ox и Oy ; I_{bk} , $I_{bk,ad}$, I_{sk} , $I_{sk,ad}$, $I_{sk,r1}$, $I_{sk,r2}$ – крутильные моменты инерции соответствующих компонент сечения; v_b , $v_{b,ad}$, v_s , $v_{s,ad}$, $v_{s,r1}$, $v_{s,r2}$ – коэффициенты секущего модуля (иначе коэффициенты упругопластической деформации) соответствующих компонент сечения; $k_{b,ad}$, k_s , $k_{s,ad}$, k_{r1} , k_{r2} – коэффициенты совместной работы. Суммирование жесткостей выполняется по элементарным площадкам (по горизонтали и вертикали).

Дальнейшее уточнение предлагаемого подхода будет заключаться в учёте фактического механизма появления и развития наклонных [10] и спиральных трещин [11] соответственно при действии перерезывающих сил и крутящего момента, в определении параметров совместной работы компонент сечения стержня (отчасти исследования на тему

усиления железобетонных балок сталефибробетонной «рубашкой» выполнены в [12]-[14]), в учёте циклической статической и динамической нагрузок, что актуально при проектировании ветроэлектрических установок башенного типа [15]-[17].

Выводы

1. Установлена преемственность диаграммного метода расчёта стержневых железобетонных элементов при косом внецентренном сжатии согласно СП 63.13330 и классического подхода сопротивления материалов.

2. Впервые получены разрешающие уравнения диаграммного метода, в которых учитывается все шесть компонент внутренних силовых факторов. Это сделано на основе интеграла перемещений Мора.

3. Предлагаемый подход имеет перспективы развития. Дальнейшее его уточнение будет заключаться в учёте фактического механизма появления и развития наклонных и спиральных трещин соответственно при действии перерезывающих сил и крутящего момента, в определении параметров совместной работы компонент сечения стержня, в учёте циклической статической и динамической нагрузок, что актуально при проектировании ветроэлектрических установок башенного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байков В.Н., Додонов М.И., Расторгуев Б.С. [и др.] Общий случай расчета прочности элементов по нормальным сечениям // Бетон и железобетон. 1987. № 5. С. 16–18.
2. Карпенко Н.И., Мухамедиев Т.А., Сапожников М.А. К построению методики расчета стержневых элементов на основе диаграмм деформирования материалов // Совершенствование методов расчета статически неопределимых железобетонных конструкций. 1987. С. 4–24.
3. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
4. Горшков А.Г., Трошин В.Н., Шалашилин В.И. Сопротивление материалов. М.: Физматлит, 2005. 544 с.
5. Карпенко Н.И. Методика расчёта стержневых железобетонных конструкций и элементов с учётом деформаций сдвига // Бетон и железобетон, 1989. №3. С. 14-16.
6. Силантьев А.С. Прочность изгибаемых железобетонных элементов без хомутов по наклонным сечениям с учетом параметров продольного армирования // Вестник МГСУ, 2011. № 2-1. С. 163-170.
7. Лазовский Е.Д., Глухов Д.О. Предпосылки, методика и программа для расчета напряженно-деформированного состояния усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. Ф, Прикладные науки. 2013. № 16. С. 33-39.
8. Соколов Б.С., Радайкин О.В. К построению диаграмм деформирования бетона при сдвиге на основе авторской теории силового сопротивления анизотропных материалов сжатия и деформационной теории пластичности // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2019. Т. 15. № 3. С. 149-160.
9. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. Проектирование бетонных, железобетонных, каменных и армокаменных элементов и конструкций с применением диаграммных методов расчёта: монография. М.: Изд-во АСВ, 2019. 194 с.
10. Залесов А.С., Климов Ю.А. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил. Киев: Будивэльник, 1989. 104 с.
11. Колчунов В.И., Демьянов А.И., Матвеев М.И. Основные результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций круглого сечения при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2020. № 3 (89). С. 3-13.
12. Радайкин О.В., Шарафутдинов Л.А. К оценке прочности, жесткости и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов, усиленных сталефибробетонной «рубашкой», на основе компьютерного моделирования в пк «Ansys» // Известия КГАСУ. 2017. №1(39). С. 111-120.
13. Радайкин О.В., Шарафутдинов Л.А. К оценке совместного влияния начальных напряжённо-деформированного состояния и силовых трещин на прочность, жесткость и трещиностойкость железобетонных

балок, усиленных сталефибробетонной «рубашкой», на основе компьютерного моделирования в пк «Ansys» // Известия КГАСУ. 2019. №1(47). С. 155-165.

14. Радайкин О.В., Шарафутдинов Л.А. Экспериментальные исследования железобетонных балок, усиленных сталефибробетонной рубашкой // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. №3. С. 34-45.

15. Mailyan L., Yaziev S., Sabitov L., Konoplev Y., Radaykin O. Stress-strain state of the "combined tower-reinforced concrete foundation-foundation soil" system for high-rise structures // E3S Web of Conferences. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019. 2020. Pp. 20-35.

16. Стрелков Ю.М., Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Радайкин О.В., Ахтямова Л.Ш. Компьютерное моделирование системы "стальная башня - железобетонный фундамент - грунт основания" ветроэлектрических установок // В сборнике: Эффективные конструкции, материалы и технологии в строительстве. Материалы международной научно-практической конференции. 2019. С. 116-127.

17. Сабитов Л.С., Коноплёв Ю.Г., Радайкин О.В. Компьютерное моделирование системы "комбинированная башня - железобетонный фундамент - грунт основания" ветроэлектрической установки для оценки ее эффективности // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 1 (78). С. 345-355.

REFERENCES

1. Baykov V.N., Dodonov M.I., Rastorguev B.S. [et al.] General case of calculating the strength of elements by normal cross-sections // Concrete and reinforced concrete. 1987. No. 5. Pp. 16-18. (rus).

2. Karpenko N.I., Mukhamediev T.A., Sapozhnikov M.A. On the construction of a method for calculating rod elements based on material deformation diagrams // Improvement of methods for calculating statically indeterminate reinforced concrete structures. 1987. Pp. 4-24. (rus).

3. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics. M.: Stroyizdat, 1996. 416 p. (rus).

4. Gorshkov A.G., Troshin V.N., Shalashilin V.I. Resistance of materials. M.: Fizmatlit, 2005. 544 p. (rus).

5. Karpenko N.I. Method of calculating rod reinforced concrete structures and elements taking into account shear deformations // Concrete and reinforced concrete. 1989. No.3. Pp. 14-16. (rus).

6. Silantev A.C. Strength of bent reinforced concrete elements without clamps on inclined sections taking into account the parameters of longitudinal reinforcement // Vestnik MGSU. 2011, No. 2-1, Pp. 163-170. (rus).

7. Lazovsky E.D., Glukhov D.O. Prerequisites, methods and program for calculating the stress-strain state of reinforced bent reinforced concrete elements in the cut zone // Bulletin of Polotsk state University. Ser. F, Applied Sciences. 2013. No. 16. Pp. 33-39. (rus).

8. Sokolov B.S., Radaykin O.V. Construction of diagrams of concrete deformation under shear based on the author's theory of force resistance of anisotropic materials to compression and deformation theory of plasticity // International journal for the calculation of civil and building structures. 2019. Vol. 15. No. 3. Pp. 149-160. (rus).

9. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaykin O.V. Design of concrete, reinforced concrete, stone and reinforced stone elements and structures using diagram calculation methods: monograph. M.: publishing house of ASV, 2019. 194 p. (rus).

10. Zalesov A.S., Klimov Yu.A. Strength of reinforced concrete structures under the action of transverse forces. Kiev: Budivelnik, 1989. 104 p. (rus).

11. Kolchunov V.I., Demyanov A.I., Matveev M.I. Main results of experimental studies of round-section reinforced concrete structures under torsion with bending // Construction and reconstruction. 2020. No. 3 (89). Pp. 3-13. (rus).

12. Radaikin O.V., Sharafutdinov L.A. To the assessment of strength, stiffness and crack resistance of bendable concrete elements reinforced by steel fiber reinforced concrete "shirt", on the basis of computer simulation in a PC "Ansys" // Izvestiya KGASU. 2017 No. 1(39). Pp. 111-120. (rus).

13. Radaikin O.V., Sharafutdinov L.A. To the assessment of the joint influence of initial stress-strain state and strength of cracks on the strength, stiffness and crack resistance of reinforced concrete beams, reinforced steel fiber concrete "shirt", on the basis of computer simulation in a PC "Ansys" // Izvestiya KGASU. 2019. No. 1(47). Pp. 155-165. (rus).

14. Radaykin O.V., Sharafutdinov L.A. Experimental studies of reinforced concrete beams reinforced with a steel-fiber concrete jacket // Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2020. No. 3. Pp. 34-45. (rus).

15. Mailyan L., Yaziev S., Sabitov L., Konoplev Y., Radaykin O. Stress-strain state of the "combined tower-reinforced concrete foundation-foundation soil" system for high-rise structures // E3S Web of Conferences. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019. 2020. Pp. 20-35.

16. Strelkov Yu.M., Sabitov L.S., Kuznetsov I.L., Radaykin O.V., Akhtyamova L.Sh. Computer modeling of the system "steel tower - reinforced concrete Foundation - ground base" of wind power installations // In the collection: Effective structures, materials and technologies in construction. Materials of the international scientific and practical conference. 2019. Pp. 116-127. (rus).

17. Sabitov L.S., Konoplev Yu.G., Radaykin O.V. Computer modeling of the system "combined tower-reinforced concrete Foundation - ground base" of a wind power plant for evaluating its efficiency // Bulletin of the Volgograd state University of architecture and civil engineering. series: construction and architecture. 2020. No. 1 (78). Pp. 345-355. (rus).

Информация об авторах:

Радайкин Олег Валерьевич

ООО Инженерный центр «Энергопрогресс», г. Казань, Россия,
кандидат технических наук, начальник отдела НИР.
E-mail: olegxxii@mail.ru

Сабитов Линар Салихзанович

ФБГОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры Энергообеспечение предприятий и энергосберегающих технологий.
E-mail: sabitov-kgasu@mail.ru

Ахтямова Лейсан Шамилевна

ФБГОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону, Россия,
аспирант кафедры Сопротивления материалов.
E-mail: Leysanas@gmail.com

Аракчеев Тимур Павлович

ФБГОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Россия,
аспирант кафедры Энергообеспечение предприятий и энергосберегающих технологий.
E-mail: leps-89@mail.ru

Information about authors:

Radaykin Oleg V.

Energoprogress Engineering center LLC, Kazan, Russia,
candidate of technical sciences, head of research Department.
E-mail: olegxxii@mail.ru

Sabitov Linar S.

Kazan state power engineering University, Kazan, Russia,
candidate of technical sciences, associate Professor of the Department of Energy supply of enterprises and energy-saving technologies.
E-mail: sabitov-kgasu@mail.ru

Akhtyamova Leysan Sh.

Don state technical University, Rostov-on-Don, Russia,
postgraduate student of the Department of Materials Resistance.
E-mail: Leysanas@gmail.com

Arakcheev Timur P.

Kazan state power engineering University, Kazan, Russia,
postgraduate student of the Department of Energy supply of enterprises and energy saving technologies.
E-mail: leps-89@mail.ru

А.А. СВЕНТИКОВ¹, Д.Н. КУЗНЕЦОВ¹¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РЕШЕТЧАТЫХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОКРЫТИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Аннотация. Архитектура современных зданий и сооружений, требует применения конструктивных систем в широком диапазоне как геометрических, так и топологических форм. Пространственные стержневые стальные конструкции позволяют создавать одни из самых вариативных, сложных и востребованных видов конструктивных форм покрытий зданий и сооружений.

Рассмотренная в статье методика построения пространственных решетчатых конструкций сложной геометрической формы, основана на автоматизированных методах компьютерного моделирования оболочечной поверхности и последующей разработки отдельной пространственной ячейки решетки определенного типа – «семейства». Структурная ячейка решетки является основой для топологической структуры строительной системы, которая создается с использованием специального программного обеспечения. Результатом указанной разработки является цифровая модель мегаструктуры всей пространственной конструкции. Последующий экспорт построенной геометрии в расчетные программные комплексы позволяет оценить напряженно-деформированное состояние системы и подобрать поперечные сечения всех ее элементов.

Разработанная в статье методология позволяет быстро и точно проектировать пространственные структурные конструкции покрытий произвольной геометрической формы. Скорость и точность моделирования и расчета решетчатых конструкций, достигаются за счет оптимизации последовательности применения современных программ и использования специальных приемов моделирования.

Ключевые слова: строительная конструкция, стержневая система, покрытие, структура, сложная геометрическая форма, моделирование криволинейных покрытий, топология строительной системы.

A.A. SVENNIKOV¹, D.N. KUZNETSOV¹¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

COMPUTER-AIDED DESIGN OF SPATIAL LATTICE STEEL STRUCTURES FOR COATINGS OF COMPLEX SHAPE

Abstract. The architecture of modern structures requires the use of structural systems in a wide range of both geometric and topological forms. Spatial steel structures are one of the most varied, complex and demanded types of structural forms of coatings for buildings and construction structures.

The method of constructing spatial lattice structures of a complex geometric shape considered in the article is based on automated methods of computer modeling of the shell surface and the subsequent development of a separate spatial cell of a lattice of a certain type - a "family". The structural cell of the lattice is the basis for the topological structure of the building system, which is created using special software. The result of this development is a digital model of the megastructure of the entire spatial structure. Subsequent export of the constructed geometry to computational software systems allows one to estimate the stress-strain state of the system and select the cross sections of all its elements.

The methodology developed in the article makes it possible to quickly and accurately design spatial structural structures of coatings of an arbitrary geometric shape. The speed and accuracy of modeling and calculation of shell lattice structures is achieved by optimizing the sequence of application of modern programs, using special modeling techniques.

Keywords: *building structure, core system, covering, structure, complex geometric shapes, modeling of curved surfaces, topology of the building system.*

Введение

Современная архитектура направляет значительные усилия на поиски новых архитектурно-конструктивных решений зданий и сооружений [1, 2]. Геометрия покрытия строительной системы является важным объектом поисковых вариантов решений [3-6]. Одним из наиболее перспективных направлений являются пространственные покрытия со сложной структурно-компоновочной организацией формы [7, 8]. Для зданий со средними и большими пролетами данные формы конструктивных решений наиболее целесообразно выполнять в виде стержневых стальных конструкций [9, 10]. Современные конструктивные решения покрытий характеризуются высокой структурно-компоновочной вариабельностью [11, 12]. В связи с этим при проектировании конструкций покрытий сложной формы возникают большие трудности в создании конструктивных и расчетных решений [13, 14].

На современном этапе в области строительства одним из эффективных инструментов разработки конструктивных решений являются программные комплексы, поддерживающие технологии информационного моделирования зданий – Building Information Modeling (BIM). Указанные технологии позволяют создавать цифровые модели конструктивных решений строительных систем со сложной геометрической и топологической формой.

В результате анализа источников рассматривающих приемы проектирования решетчатых конструкций сложной геометрической формы с использованием технологий информационного моделирования [15-18] выявлено, что практически не изучаются указанные вопросы применительно к стальным конструкциям сложной формы, с объемной структурной решеткой (не принадлежащей одной криволинейной поверхности). Наиболее близка к рассматриваемой тематике работа [19], где изучаются вопросы разработки моделей поверхностей с криволинейными образующими, но на прямоугольном плане в уровне опорной плоскости.

На основании ранее изложенного, представленная статья посвящена разработке автоматизированной методики проектирования пространственных решетчатых стальных конструкций покрытий сложной формы, с использованием современных возможностей BIM-технологий.

Модели и методы

В качестве объекта исследования назовем двухслойные решетчатые пространственные покрытия. Также данные системы носят название пространственных структур.

На рисунке 1 показана укрупненная блок-схема последовательности проектирования сложных конструктивных систем с использованием BIM-технологий.

В качестве инструмента для построения цифровых моделей пространственных структурных покрытий мы используем программную среду Revit.

На начальном этапе выполняется построение геометрической поверхности конструктивной системы в соответствии с заданной архитектурной концепцией. После этого конструктор выполняет ее деление на образующие. В программной среде Revit разбиение поверхности в двух направлениях выполняется изопараметрическими линиями. В классической теории оболочек такими линиями принято называть - линии кривизны.

На следующем этапе проектирования подбирается оптимальная структура конструкции покрытия. Для этого используются ранее созданные типы регулярной решетки, в виде отдельного «семейства» или создаются новые «семейства», с решеткой для



Последовательность дальнейших действий конструктора на данном этапе проектирования: загрузка «семейства» решетки в файл, с созданной и предварительно поделенной образующими поверхностью; выделение участка поверхности конструктивной модели и выбор на вкладке «свойства» требуемого типа решетки из числа ранее подгруженных «семейств».

После структурирования модели решетчатая конструкция покрытия дополнительно сохраняется в программе Revit, в файле с расширением «dxf», а именно: Файл – Экспорт – Форматы САПР – «dxf». Файл с расширением «dxf» содержит полную информацию по геометрии решетчатой модели покрытия и читается многими графическими и вычислительными программами. Далее в среде вычислительного комплекса (ВК) мы выполняем следующую последовательность действий: Файл – Импорт – Открыть «dxf» файл. В среде ВК на основе импортированной геометрии создают конечноэлементную

структурную расчетную модель и рассчитывают внутренние силовые факторы. Последовательность назначения геометрических граничных условий, жесткостных характеристик и нагрузок не отличается от известного алгоритма для более простых систем. Подбор поперечных сечений выполняют аналитическим методом по найденным усилиям, и/или в среде расчетной программы [20, 21].

После унификации подобранных сечений выполняется переназначение параметров решетки пространственной стержневой модели, а также корректировка поперечных сечений в ранее уже созданном «семействе». Затем выполняется изменение параметров структуры модели, и модель направляется для дальнейшей разработки архитектурных и конструктивных решений. В смежных разделах прорабатываются вопросы технологии изготовления и монтажа разработанного конструктивного решения пространственной структурной конструкции покрытия.

Результаты исследования и их анализ

Для иллюстрации описанной методики построим в программной среде Revit цифровую модель покрытия в виде гиперболического параболоида или сокращенно - гипара [22].

1. Проектирование конструктивной формы покрытия

Для моделирования поверхности в вкладке «семейства» выбираем «новые концептуальные формы» и произвольным образом задаем три дуги, расположенные в трех параллельных плоскостях. Выделяем три созданные дуги, и нажимаем команду – «создать форму». В результате получаем оболочечную несимметричную поверхность, построенную через три произвольно заданные дуги (смещенные), лежащие в трех различных плоскостях (см. рисунок 2).

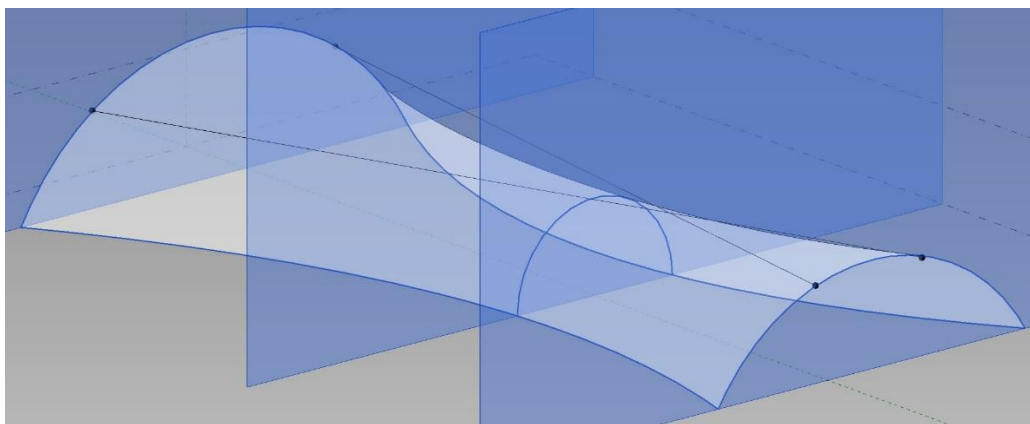


Рисунок 2 - Общий вид поверхности в виде гиперболического параболоида

Отметим, что созданная тестовая поверхность принадлежит к поверхностям с двойной главной кривизной, с разными знаками. Так как центры кривизны расположены по разные стороны относительно поверхности, то произведение двух главных кривизн или гауссова кривизна, имеет отрицательный знак:

$$K = \frac{1}{R_1} \times \frac{1}{R_2} < 0,$$

где K - гауссова кривизна; R_1 - первая главная кривизна поверхности; R_2 - вторая главная кривизна поверхности.

После построения модели поверхности, выполняем ее деление на образующие. В программной среде Revit разбиение поверхности выполняется изопараметрическими линиями.

Созданная сетка образующих линий имеет вид пересекающихся на поверхности парабол и гипербол (см. рисунок 3). В программе Revit параметры сетки образующих возможно задавать числом или геометрическим размером шага. В представленном примере поверхность гипара имеет разбиение, при котором образующие гиперболы в продольном направлении поделены поперечными параболом на пятнадцать проекционно равных частей, а каждая образующая парабола в поперечном направлении (гипара) поделена продольными гиперболами на десять равных частей.

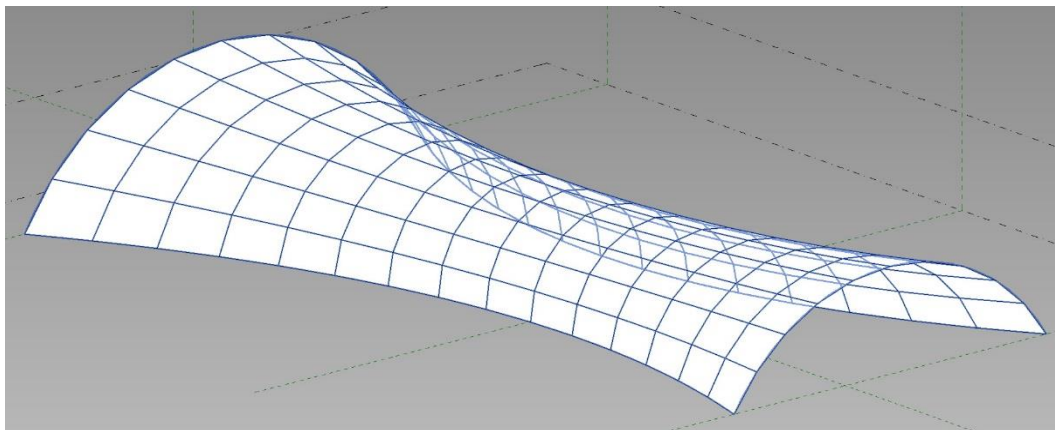


Рисунок 3 - Общий вид деления поверхности на сетку из образующих

2. Построение регулярной решетки конструкции покрытия

В программной среде Revit можно использовать известные (ранее загруженные в комплекс) виды решеток или смоделировать новый тип топологии решетки.

Для создания нового типа решетки конструктивной системы первоначально выбирается подходящее по параметрам стандартное «семейство», в файле которого создается новая конструкция решетки.

На рисунке 4 представлены два типа решетки стержневой структуры. Созданный вид решетки состоит из элементов, с сечениями в виде круглых труб. Элементы из круглых труб возможно сопрягать под разными углами, хотя узловые соединения трубчатых элементов сложны в изготовлении и не всегда надежны [23-25]. Размеры ячейки верхнего контура решетки программа корректирует, вписывая элементы без геометрических разрывов по сетке изопараметрических линий образующих поверхность.

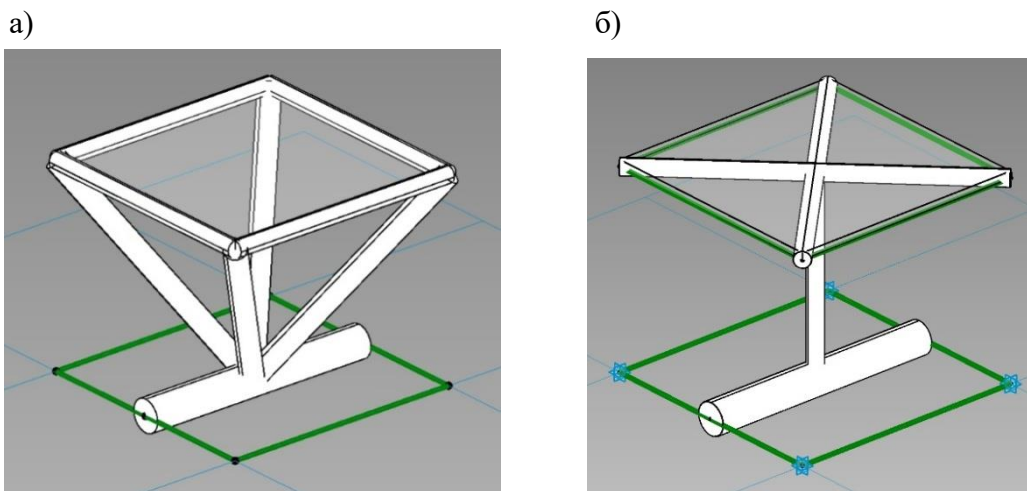


Рисунок 4 - Общий вид решетки двух типов (два «семейства»):

- а) «семейство» № 1, с четырехугольной структурой на верхнем контуре;
- б) «семейство» № 2, с крестовой структурой на верхнем контуре

Создавая представленные виды решетки, одновременно было задано покрытие (по плоскости верхнего контура решетки) в виде стекла. Такой прием позволяет облегчить работу на стадии проработки архитектурных решений и обеспечивает хорошую обзорность мегаструктуры всей конструкции. Отметим, что сложные светопрозрачные покрытия применяемые для криволинейных поверхностей подробно рассмотрены в работе [26].

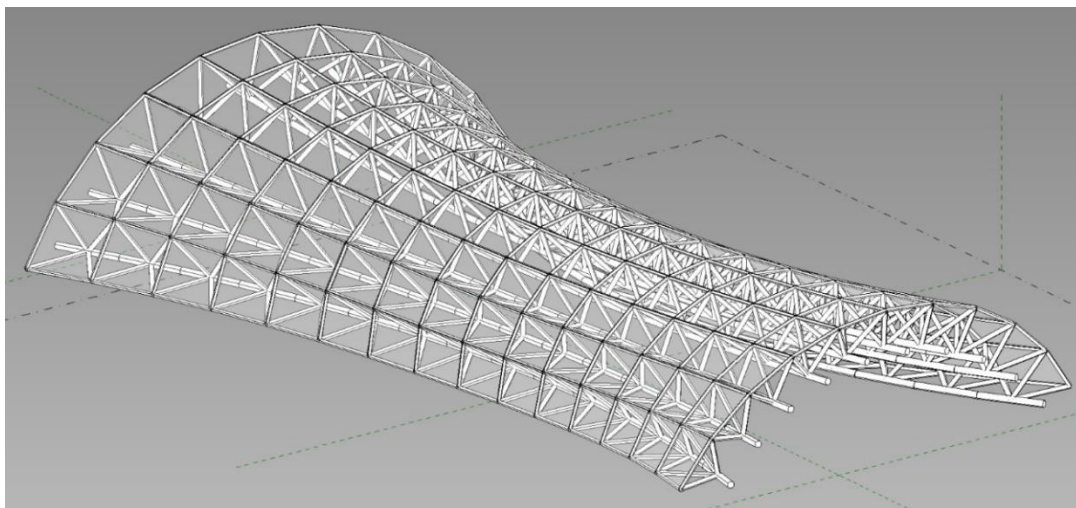
3. Построение мегаструктуры пространственной решетчатой конструкции покрытия

Создание мегаструктуры решетчатой конструкции будем выполнять по всей исходной поверхности.

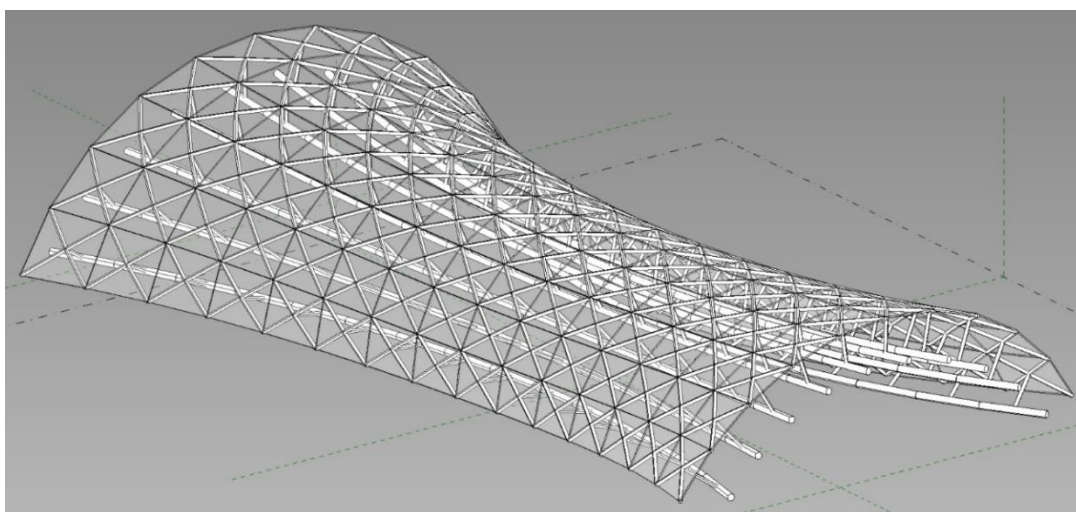
Или, другими словами, конструктивная система будет структурно однородна по всей своей поверхности.

После выделения поверхности исследуемого покрытия назначается тип структуры «семейства» - решетка. При автоматизированном построении верхняя плоскость каждой ячейки структуры «семейства» совмещается без разрывов в геометрии. На рисунке 5 представлены мегаструктуры пространственной решетчатой конструкции, в соответствии с типами решетки («семействами») №1 (см. рисунок 5а) и №2 (см. рисунок 5б).

а)



б)



*Рисунок 5 – Пространственная решетчатая конструкция покрытия
а) с решеткой из «семейства» № 1; б) с решеткой из «семейства» № 2*

Отметим, что назначенный тип решетки имеет двухстороннюю ассоциативную связь с «семейством», и любые изменения вносимые в «семейство» предоставляют возможность перестроить модель поверхности, с учетом изменений в «семействе». Кроме этого и целую модель возможно перестраивать: удалять отдельные элементы, менять геометрические параметры, добавлять новые элементы.

Для получения надежной конструкции и снижения уровня затрат важно, чтобы усилия в стержневых элементах покрытия были распределены равномерно, без перегруженных участков. Описанная выше последовательность позволяет проектировщику достаточно быстро найти эффективное конструктивное решение для сложной структурно-компоновочной организации формы покрытия.

К числу достоинств разработанной методики относится то, что созданные ранее «семейства» мы можем подгружать в файлы с другими моделями конструкций, и назначать им структуру, соответствующую выбранному «семейству». Таким образом, в системе автоматизированного проектирования создается некоторая библиотека топологии строительных систем. Для примера, назначим структуру решетки «семейства» № 2 модели сферического купола (см. рисунок 6), а также для оболочечной модели эллиптического вида с депланированным опорным контуром (см. рисунок 7), с размещением светопрозрачного покрытия на внутренней поверхности решетки.

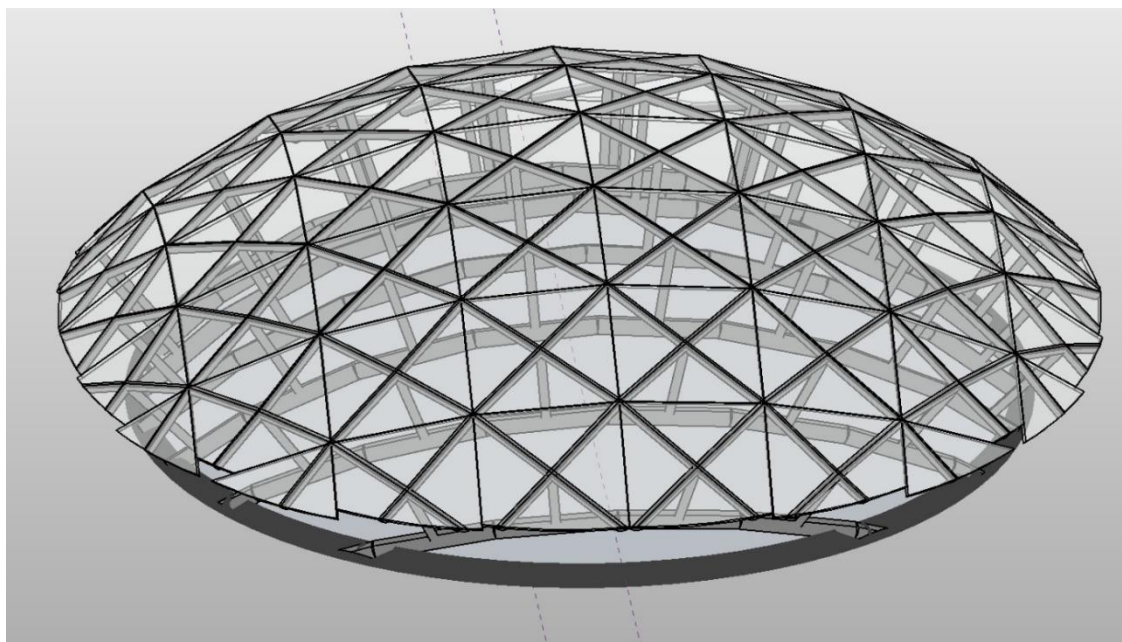


Рисунок 6 - Пространственная решетчатая конструкция покрытия в виде купола, с решеткой из «семейства» № 2

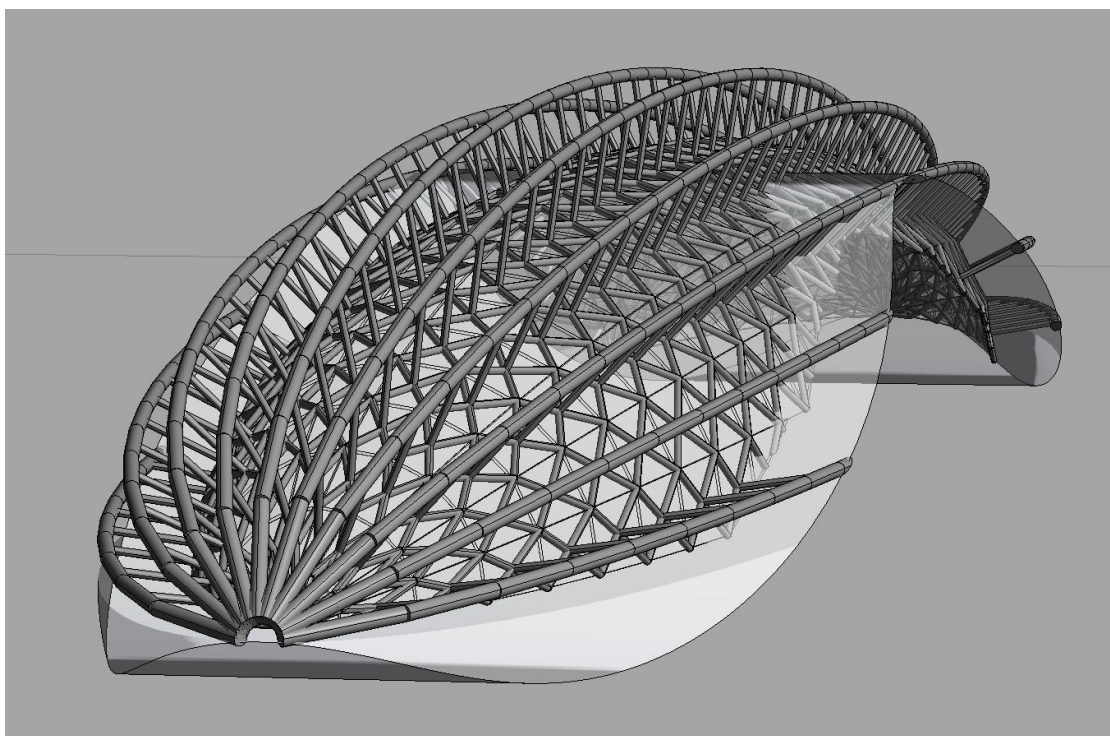


Рисунок 7 - Пространственная решетчатая оболочечная конструкция эллиптического вида, с решеткой из «семейства» № 2

4. Анализ результатов выполненного исследования

В результате выполнения описанной методики создается цифровая параметрическая модель строительной конструктивной системы. Отметим, что хотя действие данной разработки иллюстрировалось для стержневых покрытий сложной формы, она может быть применена для широкого круга различных структурных стержневых систем.

Геометрические параметры конструкции, созданной с применением технологий информационного моделирования, могут быть экспортированы на устройства для изготовления разработанной строительной системы: например, на станки, оборудованные числовым программным управлением (ЧПУ), или устройства, поддерживающие аддитивные технологии (3D принтеры) [27].

Рассмотренная в данной статье автоматизация геометрического построения пространственных решетчатых конструкций предоставляет конкурентное преимущество, которое позволяет решать сложные задачи формообразования не только строительных конструкций [28], но и в прочих важных отраслях: машиностроении, судостроении, авиации и других. Материалы отечественных работ по BIM-технологиям часто носят обзорный характер [29, 30], что требует корректировки, в пользу работ освещающих конкретные приемы моделирования конструкций. Без указанных изменений выполнить обозначенные руководством государства задачи в области применения BIM-технологий в проектировании [31], и перейти на цифровую экономику будет затруднительно.

Выводы

На основании вышеизложенных материалов статьи можно сделать следующие общие выводы:

1. На примере рассмотренных конструкций покрытий сложной геометрической формы, установлено, что проектирование конструктивных систем на одной и той же

структурной основе может иметь высокую точность и производительность, за счет использования современных автоматизированных методик.

2. Установлено, что BIM-технологии предоставляют широкие возможности для оптимизации и вариантного проектирования пространственных решетчатых стальных конструкций покрытий сложной формы.

3. Показано, что с помощью отдельно созданной структуры ячейки - «семейства», возможно построение мегаструктур со сложной структурно-компоновочной организацией формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семикин П.П., Бацунова Т.П. Динамическая архитектура. Кинетические фасады // Изв. вузов. Строительство. 2018. № 6 (714). С. 86-96.
2. Лесневская Р.В., Капустин П.В. Тектоника в архитектуре Захи Хадид до и после дигитальной революции // Научный журнал строительства и архитектуры. 2017. № 1 (45). С. 125-133.
3. Abramczyk J. Building Structures Roofed with Multi-Segment Corrugated Hyperbolic Paraboloid Steel Shells // Procedia Engineering. 2016. Vol. 161. P. 1545–1550. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.624
4. Hassanein M.F., Elchalakani M., Elkawas A.A. Design of cold-formed CHS braces for steel roof structures // Thin-Walled Structures. Elsevier Ltd, 2017. Vol. 120, № August. P. 249–259. DOI: 10.1016/j.tws.2017.09.002
5. Людковский А.М. Висячие железобетонные монолитные оболочки // Пространственные конструкции в строительстве гражданских и промышленных зданий: Сб. тр. МИСИ. М.: МИСИ, 1992. С. 81-88.
6. Hayashi S., Gondo T. Analysis of the construction of a reinforced-concrete free-form roof formwork and the development of a unit-construction method // Journal of Building Engineering. Elsevier Ltd, 2020. № September. P. 101924. DOI: 10.1016/j.job.2020.101924
7. Кузнецов Д.Н. Малый стальной сферический купол с решеткой из шестигранников // Строительная механика и конструкции. 2020. № 3 (26). С. 53-64.
8. Бирюков В.Э., Беляева С.Ю. Дебаркадер железнодорожного вокзала: основные этапы формообразования // Научный вестник ВГТУ. Серия: Студент и наука. 2016. № 9. С. 38-42.
9. Дыховичный Ю.А., Жуковский Э.З. Современные пространственные конструкции (железобетон, металл, дерево, пластмассы): Справочник. М.: Высш. шк., 1991. 543 с.
10. Еремеев П.Г. Современные стальные конструкции большепролетных покрытий уникальных зданий и сооружений. М.: Изд-во АСВ, 2009. 336 с.
11. Кривошапко С.Н. Оболочки вращения неканонических форм // Изв. вузов. Строительство. 2018. № 7 (715). С. 66-79.
12. Кривошапко С.Н. Оболочки и стержневые структуры в форме аналитически задаваемых поверхностей в современной архитектуре // Строительство и реконструкция. 2020. № 3 (89). С. 20-30. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-89-3-20-30
13. Власов В.З. Принципы построения общей технической теории оболочек и новые конструктивные формы пространственных систем // Второй международный конгресс по тонкостенным покрытиям-оболочкам. Госстройиздат: Москва, 1960. С. 106-130.
14. Вольмир А.С. Гибкие пластинки и оболочки. М.: Гостехиздат, 1956. 419 с.
15. Карпунин В.Г., Голубева Е.А. Компьютерное моделирование строительных конструкций зданий и сооружений // Архитектон: известия вузов. 2019. № 4 (68). С. 1-11.
16. Grunwald G., Hermeking T., Prang T. Kinetic Roof Structure: Msheireb Heart of Doha // Procedia Engineering. The Author(s), 2016. Vol. 155. P. 289–296. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.031
17. Jermoljev D., Bratislava M.R. Štefánik airport terminal hall steel structure // Procedia Engineering. 2012. Vol. 40. P. 165–170. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.074
18. Kociecki M., Adeli H. Shape optimization of free-form steel space-frame roof structures with complex geometries using evolutionary computing // Engineering Applications of Artificial Intelligence. Elsevier, 2015. Vol. 38. P. 168–182. DOI: 10.1016/j.engappai.2014.10.012

19. Емельянов Д.И. [и др.] Применение BIM-технологий для проектирования криволинейных покрытий на основе пространственных решетчатых конструкций // *Строительная механика и конструкции*. 2019. № 1 (20). С. 71-81.
20. Travush V.I., Belostosky A.M., Akimov P.A. Contemporary digital technologies in construction Part 1: about mathematical (numerical) modelling // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 456. 2018. P. 1–6. 012029 DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012029
21. Sventikov A.A., Kuznetsov D.N. Numerical study of the effect of the wall thickness of a steel I-beam on the form of loss of local stability // *International science conference Far East Con 2019: Materials Science and Engineering*. Vol. 753. Chapter 2. 2020. P. 1-6. 032035 DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032035
22. Милейковский И.Е., Купар А.К. Гипары. Расчет и проектирование пологих оболочек покрытий в форме гиперболических параболоидов. М.: Стройиздат, 1978. 223 с.
23. Piroglu F. [et al.] Site investigation of damages occurred in a steel space truss roof structure due to ponding // *Engineering Failure Analysis*. Elsevier Ltd, 2014. Vol. 36. P. 301-313. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.10.018
24. Pieraccini L. [et al.] The role of ductility in the collapse of a long-span steel roof in North Italy // *Engineering Failure Analysis*. Elsevier, 2017. Vol. 82, № March. P. 243-265. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.07.012
25. Chen H., Liu H., Chen Z. Compressive strength of corroded special-shaped welded hollow spherical joints based on numerical simulation // *Thin-Walled Structures*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 149, № May 2019. P. 106531. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106531
26. Еремеев П.Г., Ведяков И.И., Королева Е.А. Светопрозрачные крыши с использованием стекла для большепролетных покрытий // *Промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 6. С. 23-28. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.06.23-28
27. Subrin K. [et al.] Improvement of the mobile robot location dedicated for habitable house construction by 3D printing // *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51, № 11. P. 716–721. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.403
28. Huang M.Q., Ninić J., Zhang Q.B. BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: Current status and future perspectives // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020. № October. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103677
29. Пахарева И.В., Синицына О.В. Технология BIM: теория и практика внедрения // *Advanced Science*. 2017. № 3. С. 377-384.
30. Рыбин Е.Н. [и др.] BIM-технологии // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2019. Т. 9. № 1. С. 98-105. DOI: 10.21285/2227-2917-2019-1-98-105
31. Каган П.Б. Повышение эффективности организационно-технологического проектирования в строительстве за счет его модернизации с использованием современных цифровых технологий // *Интернет-журнал «Отходы и ресурсы»*. 2020. № 1. DOI: 10.15862/09INOR120

REFERENCES

1. Semikin P.P., Batsunova T.P. Dinamicheskaya arxitektura. Kineticheskie fasady` [Dynamic architecture. Kinetic facades] *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2018. Vol. 714. No. 6. Pp. 86-96. (rus)
2. Lesnevskaya R.V., Kapustin P.V. Tektonika v arxitekture Zaxi Xadid do i posle digital'noj revolyucii [Tectonics in architecture of Zaha Hadid before and after the digital revolution] *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2017. Vol. 45. No. 1. Pp. 125-133. (rus)
3. Abramczyk J. Building Structures Roofed with Multi-Segment Corrugated Hyperbolic Paraboloid Steel Shells. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 161. P. 1545–1550. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.624
4. Hassanein M.F., Elchalakani M., Elkawas A.A. Design of cold-formed CHS braces for steel roof structures. *Thin-Walled Structures*. Elsevier Ltd, 2017. Vol. 120, № August. P. 249–259. DOI: 10.1016/j.tws.2017.09.002
5. Lyudkovsky A.M. Visyachie zhelezobetonny`e monolitny`e obolochki [Hanging reinforced concrete monolithic shells] *Prostranstvenny`e konstrukcii v stroitel'stve grazhdanskix i promyshlenny`x zdaniy* [Spatial structures in the construction of civil and industrial buildings]: *Sb. tr. MISI*. M.: MISI, 1992. Pp. 81-88. (rus)
6. Hayashi S., Gondo T. Analysis of the construction of a reinforced-concrete free-form roof formwork and the development of a unit-construction method. *Journal of Building Engineering*. Elsevier Ltd, 2020. No. September. P. 101924. DOI: 10.1016/j.jobee.2020.101924
7. Kuznetsov D.N. Maly`j stal'noj sfericheskij kupol s reshetkoj iz shestigrannikov [Small steel spherical dome with hexagon grid]. *Stroitel'naya mexanika i konstrukcii*. 2020. Vol. 26. No. 3. Pp. 53-64. (rus)

8. Biryukov V.E., Belyaeva S.Yu. Debarkader zheleznodorozhnogo vokzala: osnovny`e e`tapy` formoobrazovaniya [Landing stage railway station: key stages of forming] *Nauchny`j vestnik VGTU. Seriya: Student i nauka*. 2016. No. 9. Pp. 38-42.
9. Dykhovichny Yu.A., Zhukovsky E.Z. Sovremennyye prostranstvenny`e konstrukcii (zhelezobeton, metall, derevo, plastmassy`): Spravochnik. [Modern spatial structures (reinforced concrete, metal, wood, plastics): Manual] Moscow, High school, 1991. 543 p. (rus)
10. Yeremeyev P.G. Sovremennyye stal'nye konstruksii bol'sheproletnykh pokrytiy unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy [Modern large-span steel structures for one of a kind building]. Moscow, ACB, 2009. 336 p. (rus)
11. Krivoshapko S.N. Obolochki vrashheniya nekanonicheskix form [Shells of revolution of non-trivial forms] *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2018. Vol. 715. No. 7. Pp. 66-79. (rus)
12. Krivoshapko S.N. Obolochki i sterzhnevye struktury v forme analiticheski nezadavaemykh poverkhnostey v sovremennoy arkhitekture [Shells and structures in the form of analytically non-given surfaces in modern architecture]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2020. Vol. 89. No. 3. Pp. 20-30. (rus). DOI: 10.33979/2073-7416-2020-89-3-20-30
13. Vlasov V.Z. Principy` postroeniya obshhej texnicheskoj teorii obolochek i novy`e konstruktivny`e formy` prostranstvenny`x sistem [Principles of construction of general technical theory of shells and new structural forms of spatial systems]. Second international congress on thin-walled shell coatings. Gosstroizdat: Moskow. 1960. Pp. 106-130.
14. Volmir A.S. Gibkie plastinki i obolochki [Flexible plates and sheaths]. Moscow, Gostekhizdat publ., 1956. 419 p. (rus)
15. Karpunin V.G., Golubeva E.A. Komp'yuternoe modelirovanie stroitel'ny`x konstrukcij zdaniy i sooruzhenij [Computer modeling of bulding structures]. *Arhitekton: izvestiya vuzov*. 2019. Vol. 68. No. 4. Pp. 1-11. (rus)
16. Grunwald G., Hermeking T., Prang T. Kinetic Roof Structure: Msheireb Heart of Doha. *Procedia Engineering*. The Author(s), 2016. Vol. 155. P. 289–296. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.031
17. Jermoljev D. Bratislava M.R. Štefánik airport terminal hall steel structure. *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 40. P. 165–170. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.074
18. Kociecki M., Adeli H. Shape optimization of free-form steel space-frame roof structures with complex geometries using evolutionary computing. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Elsevier, 2015. Vol. 38. P. 168–182. DOI: 10.1016/j.engappai.2014.10.012
19. Emelynov D.I. [et al.] Primenenie BIM-tehnologij dlya proektirovaniya krivolinyjnykh pokrytij na osnove prostranstvennykh reshchatykh konstrukcij [Application of building information modeling technologies for curvilinear roofs based on grid structure] *Stroitel'naya mexanika i konstrukcii*. 2019. Vol. 20. No 1. Pp. 71-81. (rus)
20. Travush V.I., Belostosky A.M., Akimov P.A. Contemporary digital technologies in construction Part 1: about mathematical (numerical) modelling // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 456. 2018. P. 1–6. 012029 DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012029
21. Sventikov A.A., Kuznetsov D.N. Numerical study of the effect of the wall thickness of a steel I-beam on the form of loss of local stability // *International science conference Far East Con 2019: Materials Science and Engineering*. Vol. 753. Chapter 2. 2020. P. 1-6. 032035 DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032035
22. Milejkovsky I.E., Kupar A.K. Gipary`. Raschet i proektirovanie pologix obolochek pokry`tij v forme giperbolicheskix paraboloidov [Hiparas. Calculation and design of shallow shells of coatings in the form of hyperbolic paraboloids]. Moscow, Sroizdat, 1978. p. 223. (rus)
23. Piroglu F. [et al.] Site investigation of damages occurred in a steel space truss roof structure due to ponding. *Engineering Failure Analysis*. Elsevier Ltd, 2014. Vol. 36. P. 301–313. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.10.018
24. Pieraccini L. [et al.] The role of ductility in the collapse of a long-span steel roof in North Italy. *Engineering Failure Analysis*. Elsevier, 2017. Vol. 82, № March. P. 243-265. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.07.012
25. Chen H., Liu H., Chen Z. Compressive strength of corroded special-shaped welded hollow spherical joints based on numerical simulation. *Thin-Walled Structures*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 149, No. May 2019. P. 106531. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106531
26. Yeremeyev P.G. Vedyakov I.I., Koroleva E.A. Svetoprozrachny`e kry`shi s ispol`zovaniem stekla dlya bol'sheproletny`x pokry`tij [Translucent glass roofs for large-span coverings] *Endustrial and Civil Engineering*. 2019. No. 6. Pp. 23-28. (rus). DOI: 10.33622/0869-7019.2019.06.23-28
27. Subrin K. [et al.] Improvement of the mobile robot location dedicated for habitable house construction by 3D printing. *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51, No. 11. P. 716–721. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.403

28. Huang M.Q., Ninić J., Zhang Q.B. BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: Current status and future perspectives. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020. No. October. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103677
29. Pakhareva I.V., Sinitsyna O.V. Tekhnologiya BIM: teoriya i praktika vnedreniya [Technology BIM: theory and practice of introduction] *Advanced Science*. 2017. No. 3. Pp. 377-384. (rus)
30. Rybin E.N. [et al.] BIM-tehnologii [BIM technology]. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost*. 2019. Vol. 9. No. 1. Pp. 98-105. (rus). DOI: 10.21285/2227-2917-2019-1-98-105
31. Kagan P.B. Povyshenie effektivnosti organizatsionno-tekhnologicheskogo proektirovaniya v stroitel'stve za schet ego modernizatsii s ispol'zovaniem sovremennykh tsifrovyykh tekhnologiy [Improving the effectiveness of organizational and technological design in construction due to its modernization using modern digital technologies]. *Internet-zhurnal «Othody i resursy»*. 2020. No. 1. (rus). DOI: 10.15862/09INOR120

Информация об авторах:

Свентиков Андрей Александрович

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры металлических и деревянных конструкций.
E-mail: svarka@vgasu.vrn.ru

Кузнецов Дмитрий Николаевич

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия,
старший преподаватель кафедры металлических и деревянных конструкций.
E-mail: kuznecov82@bk.ru

Information about authors:

Sventikov Andrey A.

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia,
doctor of technical sciences, professor of the department of metal and wooden constructions of VGTU.
E-mail: svarka@vgasu.vrn.ru

Kuznetsov Dmitry N.

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia,
senior lecturer of department of metal and wooden construction of VGTU.
E-mail: kuznecov82@bk.ru

Л.Ю. СТУПИШИН¹, А.В. МАСАЛОВ², Е.В. САВЕЛЬЕВА²¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия,²ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ КОМПОЗИТНОГО АРМИРУЮЩЕГО СТЕРЖНЯ НА ОСНОВЕ БАЗАЛЬТОВОЙ КОМПЛЕКСНОЙ НИТИ

Аннотация. Рассматриваются вопросы построения методики испытаний и проведение испытаний базальтовых стержней предложенных авторами. Базальтовый стержень представляет собой пучок скрученных нитей базальтового ровинга, упакованных в ламину из эпоксидной смеси. Ввиду отсутствия аналогов строится методика испытания армирующих стержней с применением существующих испытательных машин.

Проведен анализ Российских и зарубежных нормативных документов, которые могли бы лечь в основу методики испытания. Отмечается общий недостаток испытательного оборудования, приводящий к разрушению базальтовой крученой нити в захватах до начала испытания.

Предложена методика испытания и приведены результаты экспериментов, позволяющие оценить несущую способность армированного образца. Приведены выводы и рекомендации по испытанию конструкций, армированных базальтовыми стержнями - ламинами.

Ключевые слова: испытание на растяжение, композитный материал, композитный арматурный стержень, прочность на растяжение, базальтовая крученая комплексная нить, ровинг.

L.U. STUPISHIN¹, A.V. MASALOV², E.V. SAVELEVA²¹Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia²South-West State University, Kursk, Russia

TEST METHOD FOR A COMPOSITE REINFORCING ROD ON THE BASE OF BASALT COMPLEX THREAD

Abstract. The paper considers issues of construction of test methods and testing of basalt rods proposed by the authors. A basalt rod is a bundle of twisted basalt roving threads packed in an epoxy laminate. Due to the lack of analogues, a methodology for testing reinforcing rods using existing testing machines is being developed.

The analysis of Russian and foreign normative documents, which could form the basis of the test methodology, was carried out. A general lack of testing equipment is noted, leading to the destruction of the basalt twisted yarn in the grippers prior to testing.

A test procedure is proposed and the results of experiments are presented, which make it possible to assess the bearing capacity of a reinforced specimen. Conclusions and recommendations for testing structures reinforced with basalt rods - laminates are presented.

Keywords: tension test, composite material, composite reinforcing rod, tensile strength, basalt twisted multifilament thread, roving.

Введение

Армирование бетонных и каменных конструкций, работающих в агрессивных средах, а также в местах повышенной влажности требует использования арматуры, не подвергающейся коррозии. В связи с этим с начала прошлого века активно исследуются композитные конструкции с целью применения их в строительстве [1]. С появлением стеклопластиковых, базальтовых и углеродно-волоконных материалов, работы в этом

направлении возобновились с новой силой [2-7]. Такие материалы имеют физико-механические характеристики, значительно отличающие их от металлических армирующих элементов. Поэтому необходимы исследования взаимодействия бетонной матрицы с армирующими элементами на основе композитных волокон [8-16].

Особенности поведения композитной арматуры в материале под нагрузкой требуют построения методики испытаний композиционных конструкций [13, 16-19]. Это связано как с отсутствием нормативной литературы по новым композициям армирующих стержней, нитей и конструкций с дисперсным армированием, так и с непригодностью современных захватов испытательных машин к испытаниям хрупких композитных нитей.

В работе [20] приведен подход к испытанию базальтового ровинга и комплексной базальтовой нити на испытательном оборудовании с жесткими захватами. Отмечено, что вследствие большой хрупкости базальтового ровинга и его малого диаметра весьма сложно добиться того, чтобы базальтовый ровинг не разрушился до приложения нагрузки. Серьезные трудности возникают при определении разрушающей нагрузки вследствие проскальзывания элементарных нитей базальтового волокна при растяжении комплексной базальтовой нити. Чтобы избежать этих проблем авторами была предложена конструкция базальтового стержня – ламины, представленная на рисунке 1.

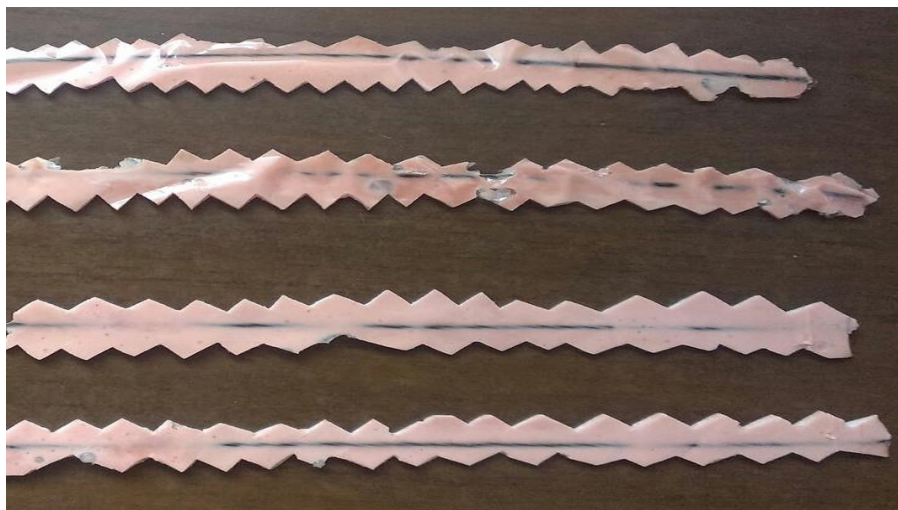


Рисунок 1 - Базальтовый стержень – ламина

Подробное описание строения предложенного авторами армирующего материала представлено в источнике [14]. Ввиду хрупкости единичных волокон базальтового ровинга и несовместности работы под нагрузкой волокон базальтовой комплексной нити [13, 20], вопрос об армировании строительных конструкций первичной и вторичной структурой материала на основе базальтового волокна не рассматривается. Основной идеей разработки композитного арматурного стержня на основе базальтовой комплексной нити является создание удобоукладываемой армирующей конструкции, обладающей повышенными прочностными характеристиками. Такая форма применения базальтового ровинга, как армирующего материала, исключает ломкость и проскальзывание волокон в захватах испытательной машины при проведении испытаний на прочность.

Композитный арматурный стержень на основе базальтовой комплексной нити представляет собой пластину (ламину) из эпоксидного связующего, в центре которой располагается несущий элемент в виде базальтовой комплексной нити. Края пластины обработаны с приданием им рифления в плоскости ламины в виде зубцов.

В поперечном сечении арматура образована волокнами базальтового ровинга, объединенными в комплексную нить путем закручивания вокруг продольной оси и обработки полимерным связующим. Волокна, составляющие базальтовую комплексную нить, непрерывны по всей длине нити. Базальтовая комплексная нить непрерывна по всей длине композитного арматурного стержня. Нить имеет в сечении круглую форму.

Для обеспечения совместности работы волокон в составе формуемого арматурного стержня базальтовая комплексная нить обработана эпоксидным связующим. Эпоксидное связующее полностью пропитывает базальтовую комплексную нить, тем самым объединяя отдельные волокна, составляющие нить в стержень. Это обеспечивает равномерное распределение напряжений по всему диаметру стержня и, следовательно, более полно включает в работу под нагрузкой волокна базальтовой комплексной нити. Благодаря полной пропитке улучшаются прочностные свойства изделия. Эпоксидное связующее покрывает базальтовую комплексную нить и тем самым образует защитный слой, защищающий волокна ровинга от агрессивной щелочной среды бетона. В плоскости ламины излишкам эпоксидного связующего придана форма зубцов, чтобы осуществлять анкеровку арматурного стержня в бетоне. Отступы от базальтовой комплексной нити до основания зубца необходимы для предотвращения появления под нагрузкой трещин в эпоксидном слое, обнажающих поверхность базальтовой нити и тем самым создающих появление ослабленных зон армирующего материала.

Отвержденное эпоксидное связующее фиксирует положение базальтовой комплексной нити и придает форму арматурному стержню.

Благодаря наличию этих признаков новая конструкция композитного арматурного стержня на основе базальтовой комплексной нити обладает высокими прочностными свойствами. Предел прочности при растяжении композиционного арматурного стержня на основе базальтовой комплексной нити составляет в среднем 330 МПа, что ставит такой армирующий элемент в один ряд со стальной арматурой по прочности.

2 Анализ нормативной базы по методикам исследования прочностных характеристик материалов

Существенную роль в разработке методики испытания армирующего элемента на основе базальтовой комплексной нити играет его правильная классификация. В связи с тем, что заявленный армирующий элемент обладает свойствами, присущими нити, стержню и ламинату, подбор ближайшей по смыслу методики испытания осуществлялся с использованием нормативных документов, затрагивающих методики испытаний всех вышеперечисленных классов материалов.

Согласно определению строительной механики стержень представляет собой тело удлиненной формы, два размера которого (высота и ширина) малы по сравнению с третьим размером (длиной). Термином «стержень» называют тела удлиненной формы, которые сопротивляются только усилиям сжатия и растяжения.

Основное назначение стержней — воспринимать осевые (растягивающие и сжимающие силы), а также изгибающие моменты. Частным случаем стержней являются гибкие нити, которые работают только на растяжение, не оказывая сопротивления сжатию и изгибу.

В России испытания текстильных нитей проводят согласно ГОСТ 6611.2-73 «Нити текстильные. Методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве». Данный стандарт касается вопросов продолжительности и скорости растяжения нитей. По результатам испытаний определяется величина разрывной нагрузки и удлинение при разрыве. Известен нормативный документ ГОСТ 6943.10-2015 «Материалы текстильные стеклянные. Метод определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве», который

описывает методику испытаний нитей, ровинга, полосок, вырезанных из ткани, сеток, лент, нетканого материала. Аналогичный зарубежный документ ASTM D7269 D7269M-11 регламентирует большее число методов определения физико-механических параметров нитей. В дополнение к Российским документам, в нем описана методика определения предела прочности на разрыв, сопротивления разрыву при растяжении, усилия, соответствующего конкретному удлинению, линейной плотности, модуля упругости, работы, затраченной на разрыв. Сущность обоих стандартов сводится к закреплению нити в захватах испытательной машины, приложению нагрузки для достижения определенного предварительного натяжения, растяжению нити до разрыва и определению ее физико-механических параметров.

Источник [19] приводит действующие зарубежные стандарты, которые применимы для определения физико-механических характеристик нитей (методы испытания на растяжение):

ISO 2307:2010. Канаты из волокон — определение некоторых физических и механических свойств (Fibre ropes-Determination of Certain physical and mechanical properties);

ISO 5079:1995. Волокна текстильные — определение разрывного усилия и относительного удлинения при разрыве одиночных волокон (Textile fibres — Determination of breaking force and elongation at break of individual fibres);

ISO 2062:2009. Текстиль — пряжа в паковках — определение разрывного усилия и относительного удлинения при разрыве одиночной нити с применением прибора для испытания на растяжение с постоянной скоростью (CRE) (Textiles — Yarns from packages — Determination of single-end breaking force and elongation at break using constant rate of extension (CRE) tester);

JIS L 1013:2010. Методы испытаний искусственных волоконных нитей (Testing methods for man-made filament yarns (соответствует, но не эквивалентен международным стандартам ISO 2060:1994);

JIS L 1095:2010. Методы испытаний крученых нитей (Testing methods for spun yarn) соответствует (модифицированный стандарт) международным стандартам ISO 2061:1995, ISO 2062:1993, ISO 6939:1988).

Предложенные документы применимы для определения прочностных характеристик волокон и нитей, однако на данном этапе исследования, как уже было сказано, изучение свойств первичной и вторичной, соответственно, структур армирующих базальтовых материалов утратило свою актуальность в связи с хрупкостью базальтовых волокон и другими проблемами, обозначенными в работах [1, 13, 20, 21].

Методика исследования прочностных и деформационных свойств композитных материалов, выполненных в форме ламинатов, приводится в нормативных документах:

ГОСТ 25.601-80 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах»

ГОСТ 34261-2017 (ISO 9163:2005) «Стекловолокно. Ровинги. Изготовление испытательных образцов и определение прочности на растяжение пропитанных ровингов».

ГОСТ 10213-2002 (ISO) «Волокно штапельное и жгут химическое. Методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве».

ГОСТ 33345-2015 (ISO) «Композиты полимерные, производство пластин для изготовления образцов для испытаний».

ГОСТ 56785-2015 «Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение плоских образцов».

В перечисленных источниках в испытательные захваты устанавливаются предварительно изготовленные пластины (ленты) армирующего материала прямоугольной

или сложной формы с переменным сечением. Изготовление таких образцов в условиях исследований, проводимых авторами нецелесообразно, поскольку исследуется иная форма применения материала.

По мнению авторов, на данном этапе исследований, ближайшим нормативным документом, регламентирующим определение прочностных свойств композитного арматурного стержня на основе базальтовой комплексной нити [14] является ГОСТ 31938-2012 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия». Данный нормативный документ позволяет рассматривать предложенный армирующий материал как стержень и предполагает устройство не кнехтовых, как в случае с нитью, а обжимающих захватов, не требующих клеевой обработки участков образцов в захватах. Именно эта методика была взята за основу и подвергалась модернизации с целью обеспечения наибольшего соответствия заявляемому материалу.

3 Подготовка испытательных стенов для ручного и автоматического нагружения. Описание устройства закрепления композитного армирующего элемента в захватах испытательной машины

Согласно ГОСТ 31938-2012 для проведения испытаний на растяжение образцов ПКА, их концы перед испытанием необходимо замоноличивать в специальные стальные трубы, анкера. Описанная методика предполагает разрушение образца на рабочем участке без разрыва и проскальзывания образца в захватах или в зоне анкера. Однако предложенная методика не исключала бы возможность вырывания или проскальзывания элементарных волокон ровинга, не позволяла бы следить за поведением исследуемого стержня внутри анкера, местами появления разрывов, а так же разрывов на границе рабочей зоны. В исследованиях, проведенных в КГАСУ [13], при использовании данной методики при испытании арматуры малого диаметра, наблюдалась тенденция появления разрывов в зоне границы с анкером.

В связи с этим было принято решение об устройстве открытых захватов, представляющих собой вспомогательные захватные устройства в виде деревянных накладок из мягкой древесины (сосна) для равномерного распределения обжимающего усилия по поверхности стержня композитной арматуры.

В исследовании использовались вспомогательные захватные устройства двух типов:

1. Штучные деревянные накладки из мягкой сухой древесины, устанавливаемые непосредственно в металлические захваты разрывной испытательной машины (рисунок 2а).
2. Деревянные обжимающие накладки с выносом из захватов разрывной испытательной машины с применением дополнительных металлических обжимающих устройств (рисунок 2 б, в).

Обжимающее устройство устанавливалось в захват испытательной машины по обе стороны от испытуемого стержня. Деформация сухой древесины при зажиме захвата обеспечивала плотное неповреждающее обжатие стержня, и как следствие, более надежное защемление испытуемого образца, исключала проскальзывание образца в захватах при приложении нагрузки и его разрушение. Устройство перфорированной обжимающей пластины (рисунок 2б) на выносе из захватов в дальнейшем позволит авторам проводить испытания независимо от площади захватов разрывных машин, а так же от площади и формы исследуемого образца.

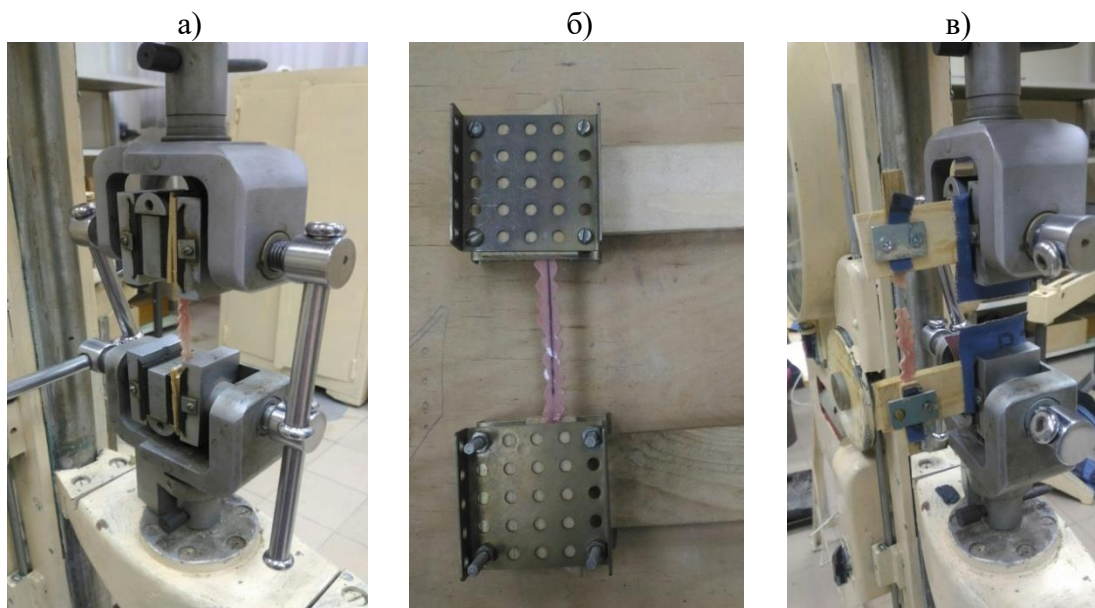


Рисунок 2 – Общий вид испытаний: а) обжимающие устройства для передачи усилия от захвата испытуемым композитным стержням; б) накладки из мягкой сухой древесины; в) деревянные накладки с выносом из захватов

Стержни устанавливались в захваты испытательной машины так, чтобы длина рабочей зоны составляла не менее трети длины самого стержня согласно методике ГОСТ. Положение продольной оси тщательно выверялось по осевым рискам на захватах прибора.

После проведения испытаний, осмотр рельефа деревянных накладок установил появление отпечатка профиля стержня на деревянных волокнах (рисунок 3). При обжатии стержня захватами, происходило его вдавливание в деревянные накладки со смятием накладок. Сами накладки не изменяли своего положения в захватах. Структура, форма и целостность стержней так же не была нарушена. Это может свидетельствовать об эффективности примененного способа защемления.



Рисунок 3 – След композитного стержня на деревянных накладках для обжатия

Для определения относительного удлинения исследуемых образцов использовался индикатор деформации часового типа (рисунок 4). Шкала индикатора позволяла измерять приращение длины образца в нанометрах. Такой прибор, как правило, устанавливается вертикально, используется для измерения удлинения конструкций при изгибе и имеет ножки- конусы, перемещения которых отражаются на показаниях шкалы. Для исключения

повреждения исследуемых стержней- ламин, ножки прибора устанавливались не на сам стержень, а так же на деревянную насадку. (рисунок 4)

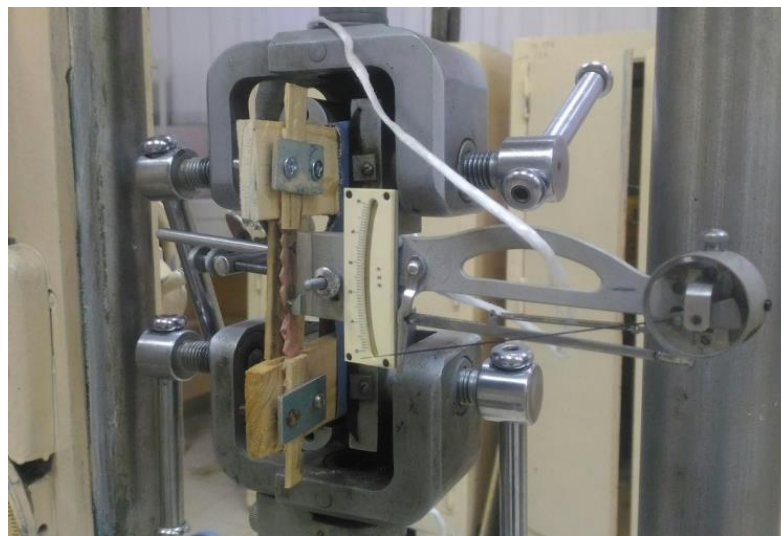
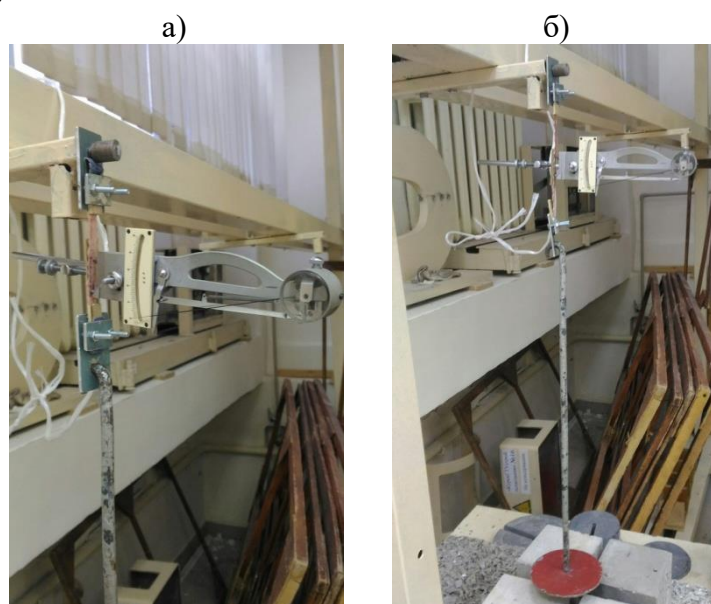


Рисунок 4 – Установка индикатора часового типа на исследуемый образец

Представленный выше способ закрепления образцов и их испытания с помощью разрывной машины не позволял достоверно оценить зависимость деформации композитного арматурного стержня от приложенной нагрузки вследствие высокой скорости нагружения и особенностей функционирования прибора, измеряющего деформации. Результаты этих испытаний учтены при определении средней прочности партии.

Для определения модуля упругости необходимо четко отслеживать, какая деформация соответствует начальной и конечной нагрузке на образец. Поэтому часть исследуемой партии загружалась вручную. Такой способ загрузки позволял вовремя тарировать шкалу прибора и получать наиболее точные показания деформации, а так же отслеживать поведение материала в захватах. Устройство конструкции для ручного нагружения представлено на рисунке 5.



*Рисунок 5- Испытательный стенд для загрузки вручную:
а) вид захватов и расположения индикатора; б) общий вид конструкции испытательного стенда*

В ходе проведения испытаний, армирующий материал не вытягивался из захватов испытательной машины, не повреждался при обжатии, что может свидетельствовать об эффективности примененной методики закрепления армирующих стержней в захватах прибора [20]. При разрушении образца происходил единовременный разрыв базальтовой комплексной нити и эпоксидного слоя на одном участке, принадлежащем рабочей зоне (рисунок 6). Вытягивание отдельных базальтовых нитей не наблюдалось.

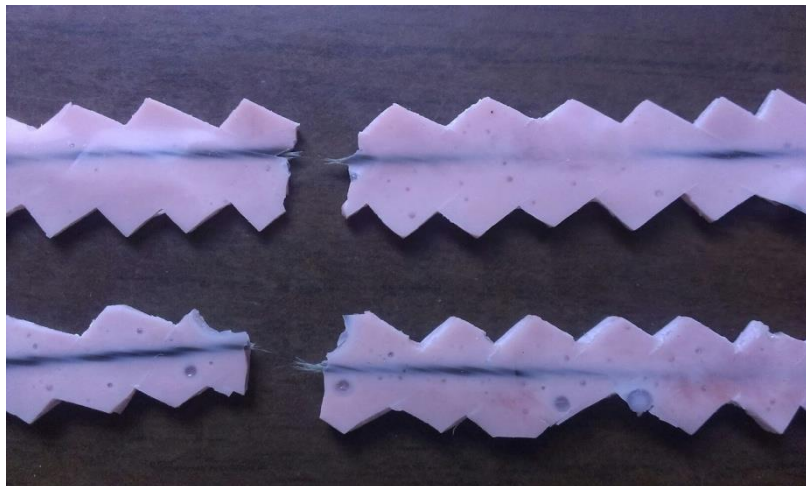


Рисунок 6 – Характер разрыва композитного арматурного стержня на основе базальтовой комплексной нити

Места разрывов образцов находились ближе к верхнему неподвижному краю захвата в рабочей зоне испытываемого образца (рисунок 7). Разрывов, выскальзываний и повреждений образцов в захватах не наблюдалось. может свидетельствовать об эффективности примененной методики испытания [6,11,15,19, Это 21]. Это может свидетельствовать об эффективности примененной методики испытания [13, 16-19].

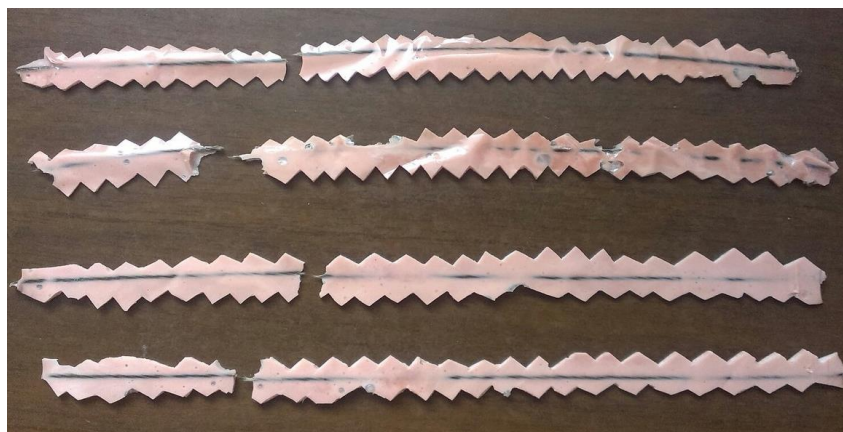


Рисунок 7 – Места разрывов образцов

Единовременный характер разрыва образцов может свидетельствовать о равномерности работы волокон, составляющих базальтовую комплексную нить, о качественной пропитке базальтового армирующего материала эпоксидным связующим и о приемлемых параметрах вязкости выбранного эпоксидного связующего [16-18].

4 Результаты исследований и их анализ

Приближенное определение геометрических параметров образцов стержней проводилось с учетом методики ГОСТ 25.601-80 «Методы механических испытаний

композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов)». Согласно методике ГОСТ 25.601-80 перед испытанием толщина и ширина рабочей части образца измеряется в трех местах: по краям и в середине. Конечный результат наружных параметров образца усредняется. Методика ГОСТ 25.601-80 предполагает использование образцов прямоугольного сечения с закрепленными на концах накладками или без них. Площадь поперечного сечения таких образцов можно вычислить, используя значения поддающихся измерению параметров длины и ширины. Измерение площади поперечного сечения базальтовой комплексной нити, как несущего элемента композитного арматурного стержня, тем же способом не представляется возможным, поскольку из-за миниатюрности сечения испытываемых образцов не известна достоверно их форма, а так же невозможно воспользоваться любыми измерительными приборами, не оснащенными оптическим увеличителем.

Для определения геометрических наружных параметров образца воспользуемся данными о плотности базальтокомпозитной арматуры ($1,9 \text{ г/см}^3$) и формулами (1) и (2) для определения объема геометрического тела. С использованием измерений длины и веса базальтовой комплексной нити (текс), вычислим площадь поперечного сечения:

$$V = m/\rho, \quad (1)$$

где V - объем геометрического тела, m -масса образца, ρ - плотность материала.

$$V = m/\rho = 0,4/1,9 = 0,21 \text{ см}^3, \\ V = S \cdot l, \quad (2)$$

где V - объем геометрического тела, S -площадь поперечного сечения, l - длина образца.

$$S = \frac{V}{l} = \frac{0,21}{72,5} = 0,003 \text{ см}^2$$

С учетом предел прочности при растяжении определяют по формуле:

$$\sigma_B = \frac{F_{max}}{S},$$

где F_{max} -максимальная нагрузка, предшествующая разрушению образца, S - площадь поперечного сечения образца.

При определении предельной нагрузки, поскольку осевым элементом стержня является базальтовая комплексная нить, будем пользоваться формулами методики ГОСТ 16009-2001 «Волокно штапельное и жгут химические. Метод определения разрывной нагрузки при разрыве петель» с преобразованием формул под испытание прямых образцов, в отличие от тех, что приведены в нормативном документе для определения предельной разрывной нагрузки петель.

Скорость движения захвата при автоматическом нагружении находилась в рекомендуемом диапазоне 5-20 мм/мин. Так же при использовании автоматической разрывной машины производилось трехкратное циклическое нагружение- разгружение испытываемых стержней до требуемого уровня (15-40% от F_{max} , среднее значение которой было взято из предыдущих опытов). При каждом нагружении считывались показания деформаций при начальной (2-5%) и максимальной (15-40%) нагрузках, усредненный показатель заносился в таблицу.

Фактическое значение предельной разрывной нагрузки P_ϕ , вычислим как среднеарифметическое значение результатов всех единичных испытаний по формуле

$$P_\phi = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{n},$$

где $\sum_{i=1}^n F_i$ - сумма результатов испытаний;

n - число испытаний.

Удельную разрывную нагрузку при разрыве P_y , $\text{мН/г}\cdot\text{см}^3$, определим по формуле

$$P_y = \frac{9,81 \cdot P_\phi}{T_\phi},$$

где T_ϕ - фактическая плотность испытываемого материала

Значение начального модуля упругости E_f , МПа, рассчитывают как отношение приращений нагрузок при растяжении в интервале от $0,2P$ до $0,5P$ и деформаций по формуле

$$E_f = \frac{P_1 - P_2}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)},$$

где P_1 - нагрузка, составляющая $(50 \pm 2)\%$ разрушающей нагрузки, Н; P_2 - нагрузка, составляющая $(20 \pm 2)\%$ разрушающей нагрузки, Н; ε_1 - деформация, соответствующая нагрузке P_1 ; ε_2 - деформация, соответствующая нагрузке P_2 .

Относительное удлинение при разрушающей нагрузке ε_B , мм/мм, рассчитывают по формуле

$$\varepsilon_B = \frac{P}{E_f S}.$$

Значения оцениваемой характеристики и величин определяют с точностью до 0,001.

Результаты испытаний базальтовых армирующих материалов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты испытаний на прочность композитных арматурных стержней при автоматическом нагружении

№ обр.	S поперечного сечения, $1 \cdot 10^{-3}$ см ²	Разрушающая нагрузка, Н	Предел прочности при растяжении σ_B , МПа	Примечания
1	3	383	1275	Единовременный разрыв базальтовой комплексной нити и эпоксидной обработки в пределах рабочей зоны образца
2		353	1177	
3		275	916	
4		294	981	
5		314	1046	Достижение указанной нагрузки, трещина в эпоксидном слое, вытягивание из захвата.
Среднее значение		332	1105	

Таблица 2. Результаты испытаний на деформации композитных арматурных стержней при ручном нагружении

№ п.п.	Начальная длина стержня l_0 (мм)	Нагрузка начальная/конечная, P_1/P_2 (кгс/Н)	Максимальная нагрузка F_{max} (кгс/Н)	Удлинение при начальной нагрузке $\Delta l_1 \cdot 10^{-9} / 2 \cdot 10^{-3}$ (мм)	Удлинение при конечной нагрузке $\Delta l_2 \cdot 10^{-9} / 2 \cdot 10^{-3}$ (мм)	Удлинение $\Delta l \cdot 10^{-9} / 2 \cdot 10^{-3}$ при F_{max} (мм)	Относительная продольная деформация $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$	Относительное удлинение $\frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%$, (%)
1	110	5/9,4	28	24	49	76	$0,345 \cdot 10^{-6}$	$34,5 \cdot 10^{-6}$
2	110	14,2/17,0	33	36	48	80	$0,36 \cdot 10^{-6}$	$36 \cdot 10^{-6}$
3	110	14,8/20	32	60	70	130	$0,59 \cdot 10^{-6}$	$59 \cdot 10^{-6}$
4	110	5,3/15,4	29,4	43,5	119	149	$0,67 \cdot 10^{-6}$	$67 \cdot 10^{-6}$
5	112	10/18,3	35	39	49	57	$0,25 \cdot 10^{-6}$	$25 \cdot 10^{-6}$
6	111	14,4/29,2	38	100	135	185	$0,83 \cdot 10^{-6}$	$83 \cdot 10^{-6}$
7	110	12/26,8	40	80	170	230	$1,05 \cdot 10^{-6}$	$10,5 \cdot 10^{-6}$

Как видно из таблицы 2, удлинения образцов на всех этапах загрузки весьма малы.

Ниже представлен график кусочно - линейной траектории, характеризующий относительное удлинение образцов в зависимости от прикладываемой нагрузки (рисунок 8). Данный график построен для стержней, загружаемых вручную.

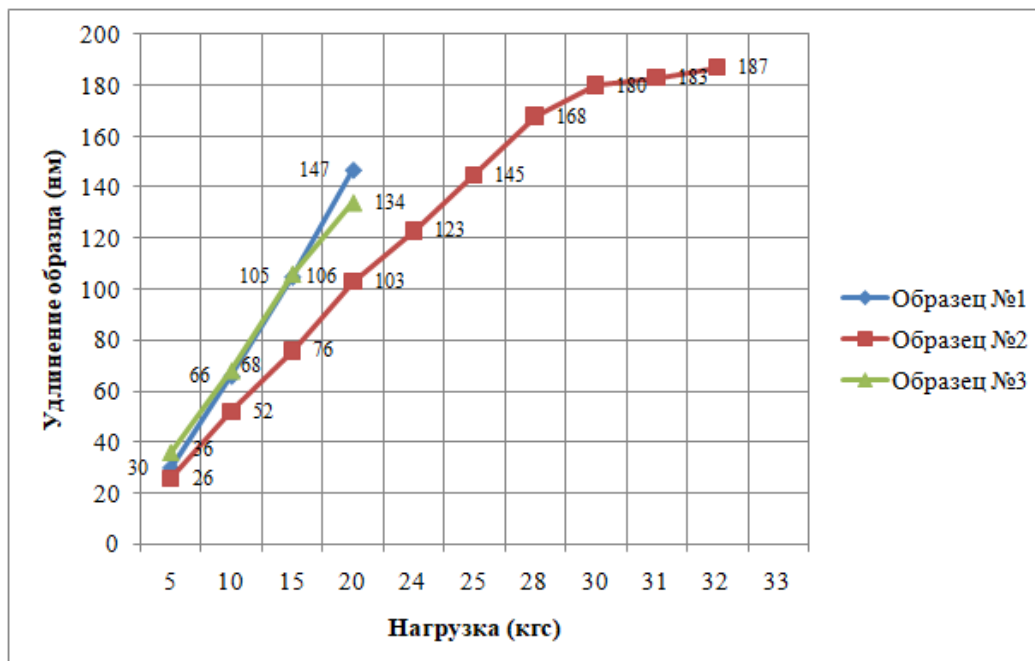


Рисунок 8 – График зависимости удлинения композитных арматурных стержней от нагрузки

Разрыв образцов происходил в диапазоне нагрузки от 15 до 33 кгс. Данные, полученные при ручном загрузении образцов (рисунок 9), не противоречат величинам нагрузки, зафиксированным при испытании стержней на автоматической разрывной машине.

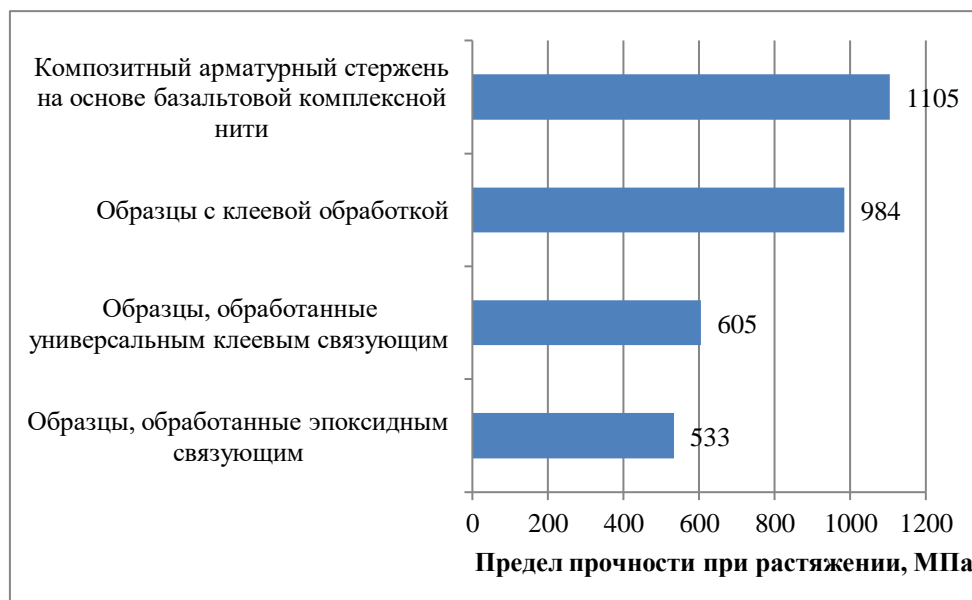


Рисунок 9 – Средние значения прочностей базальтовых армирующих материалов

Сравнительный анализ прочности композитного армирующего материала с прочностью сырьевых базальтовых материалов в виде ровинга и базальтовой комплексной нити с различной клеевой обработкой, а так же исследования, которые приведены в работах

[15,20], показывают преимущество предложенного армирующего элемента. Характер разрыва испытанных базальтокомпозитных стержней, а именно совпадение положения разрыва эпоксидного связующего и базальтовой нити, говорит о совместности работы армирующего наполнителя и эпоксидной матрицы, комплексном восприятии усилия элементарными волокнами в составе армирующего элемента- нити и качестве клеевой обработки.

Полученные данные деформаций армирующих элементов лягут в основу математических расчетов конструкций, армируемых такими стержнями.

Выводы

В рамках исследований, проведенных в данной работе, достигнуты следующие положительные научные результаты:

Предложен новый тип армирующего материала - композитный арматурный стержень на основе базальтовой комплексной нити

Проведен анализ Российских и зарубежных нормативных документов, которые могли бы лечь в основу методики испытания.

Рассмотрены вопросы построения методики испытаний стержней, предложенных авторами: определен и взят за основу наиболее близкий аналог методики испытания согласно существующему ГОСТ.

Предложена методика испытания и приведены результаты экспериментов, позволяющие оценить несущую способность армирующего образца.

Приводятся данные о деформации образцов при загрузке вручную. Показано, что данные о разрушающей нагрузке, полученные при загрузке вручную и с помощью автоматической разрывной машины не противоречат друг другу.

Полученные результаты позволяют судить об успешном применении предложенной методики испытания, а так же характеризуют заявленный армирующий материал как перспективный благодаря полученным деформативно-прочностным характеристикам. Дальнейшие изыскания авторов будут посвящены исследованию влияния предложенного армирующего материала на прочность изгибаемых элементов строительных конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарнопольский Ю.М., Кулаков В.Л. Методы испытаний композитов. Обзор исследований, выполненных в ИПМ АН Латвии в 1964-2000 гг. // Механика композитных материалов. 2001. Т.37. №5/6. С.669-693.
2. Грановский А.В., Галишников В.В., Берестенко Е.И. Перспективы применения арматурных сеток на основе базальтового волокна в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 59-63.
3. Далинкевич А.А., Гумаргалиева К.З., Мараховский С.С., Асеев А.В. Базальтоволоконистые полимерные композиты как перспективные коррозионно-стойкие материалы. Ч. 1. Механические свойства непрерывных базальтовых волокон и базальтопластиков (обзор) // Коррозия: материалы, защита. 2015. № 4. С. 37-42.
4. Зиннуров Т.А., Пискунов А.А., Сафиюлина Л.Г., Петропавловских О.К., Яковлев Д.Г. Численное моделирование сцепления композитной арматуры с бетоном // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2015. Том 7. №4. <http://naukovedenie.ru/PDF/11TVN415.pdf>, DOI:10.15862/11TVN415.
5. Кириченко В.А., Лебедев И.С. Применение неметаллической арматуры на стройках Краснодарского региона // Научные труды КубГТУ. 2018. № 1. С. 47-54.
6. Кудяков А.В., Стешенко А.Б. Пенобетон дисперсно-армированный теплоизоляционный естественного твердения // Вестник ТГАСУ. 2014. № 2. С. 127-133.
7. Римшин В.И., Кустикова Ю.О. Теоретические основы расчета сцепления стеклобазальтопластиковой арматуры с бетоном // Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство. Транспорт». 2009. №2/22 (554). С.29-34.

8. Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Rozina V.Ye., Buyantuev S.L., Bardakhanov S.P. Increased corrosion resistance of basalt reinforced cement compositions with nanosilica. *Nanotechnologii v stroitel'stve* Nanotechnologies in Construction. 2014. Vol. 6. no. 4. Pp. 15–29. Available at: http://nanobuild.ru/en_EN.
9. Кустикова Ю.О. Исследование свойств базальтопластиковой арматуры и ее сцепления с бетоном [Электронный ресурс] // Строительство: наука и образование. 2014. № 1. Ст. 1 Режим доступа: <http://www.nso-journal.ru>.
10. Кычкин А.К., Васильева А.А. Исследование физико-механических характеристик композиционных арматурных стержней, изготовленных на основе базальтового ровинга // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2012. Т. 9. № 3. С. 80-85.
11. Сарайкина К.А., Голубев В.А., Яковлев Г.И., Сеньков С.А., Политаева А.И. Наноструктурирование цементного камня при дисперсном армировании базальтовым волокном // Строительные материалы. 2015. № 2. С. 34-38. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2015-722-2-34-38>
12. Старовойтова И.А., Зыкова Е.С., Сулейманов А.М., Семенов А.Н., Мишурова М.В. Изучение физико-механических характеристик наномодифицированного базальтового ровинга и композиционного материала на его основе // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 3 (37). С. 217-224
13. Ступишин Л.Ю., Савельева Е.В., Масалов А.В., Почерняев Д.А. Исследование прочностных характеристик композиционной арматуры на основе базальтовой комплексной нити // «Современные технологии композиционных материалов», Материалы II молодежной научно-практической конференции смеждународным участием, Уфа: РИЦ БашГУ, 2016. С. 67-70.
14. Ступишин Л.Ю., Масалов А.В., Савельева Е.В. Композиционный арматурный стержень на основе базальтовой комплексной нити // патент на полезную модель RUS 170083 31.10.2016.
15. Ступишин Л.Ю. Вариационный критерий критических уровней внутренней энергии деформируемого тела // Промышленное и гражданское строительство. 2011. №8. С. 21-23.
16. Харун М., Коротеев Д.Д., Дхар П., Ждеро С., Елроба Ш.М. Физико-механические свойства базальто-волокнутого высокопрочного бетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. №5. С. 396–403. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-5-396-403
17. Караваев И.В., Румянцева В.Е. К вопросам методики проведения испытаний анкеровки арматуры неметаллической композитной в бетоне // Строительство и реконструкция. 2015. №(57) С. 108-114
18. Перечесова А. Д., Соловьева Г. А. Особенности испытания на растяжение арамидных нитей //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. №. 10. С. 66-70.
19. Хозин В.Г., Куклин А.Н. Особенности испытаний и характер разрушения полимеркомпозитной арматуры// Инженерно-строительный журнал. 2014. №3. С. 40-50.
20. Stupishin L.Yu., Savelyeva E.V., Emelyanov S.G., Altuhov F.V. Tensile Test Method for Basalt Roving // Key Engineering Materials. 2019. Vol. 821. Pp 506-511.
21. Харун М., Коротеев Д.Д., Йович М., Волков Е.А. Параметры механики разрушения базальто-волокнутого высокопрочного бетона // Строительство и реконструкция. 2018. №5(79) С. 112-124.

REFERENCES

1. Tarnopolsky Yu.M., Kulakov V.L. Metody ispytaniy kompozitov. Obzor issledovaniy, vypolnennykh v IPM AN Latvii v 1964-2000 [Testing methods for composites. Review of research carried out at the Institute of Applied Mathematics of the Academy of Sciences of Latvia in 1964-2000]. *Mekhanika kompozitnykh materialov*. 2001. T.37. No.5 / 6.-P.669-693.
2. Granovsky A.V., Galishnikova V.V., Berestenko E.I. Perspektivy primeneniya armaturnykh setok na osnove bazal'tovogo volokna v stroitel'stve [Prospects for the use of basalt fiber-based reinforcement meshes in construction]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2015. No. 3. Pp. 59-63.
3. Dalinkevich AA, Gumargalieva KZ, Marakhovsky SS, Aseev AV Bazal'tovoloknistyye polimernyye kompozity kak perspektivnyye korrozionno-stoykiye materialy. CH. 1. Mekhanicheskiye svoystva nepreryvnykh bazal'tovykh volokon i bazal'toplastikov [Basalt fiber polymer composites as promising corrosion-resistant materials. Part 1. Mechanical properties of continuous basalt fibers and basalt-plastics (review)]. *Korroziya: materialy, zashchita*. 2015. No. 4. Pp. 37-42.
4. Zinnurov T.A., Piskunov A.A., Safiyulina L.G., Petropavlovskikh O.K., Yakovlev D.G. Chislennoye modelirovaniye stsepleniya kompozitnoy armatury s betonom [Numerical modeling of adhesion of composite reinforcement to concrete]. *Naukovodenie Internet magazine*. 2015. Volume 7. No. 4. <http://naukovedenie.ru/PDF/11TVN415.pdf>, DOI: 10.15862 / 11TVN415.
5. Kirichenko V.A., Lebedev I.S. Primeneniye nemetallicheskoй armatury na stroykakh krasnodarskogo regiona [Application of non-metallic fittings at construction sites of the Krasnodar region]. *Nauchnyye trudy KubGTU*. 2018. No. 1, pp. 47-54.

6. Kudiyakov A.V., Steshenko A.B. Penobeton dispersno-armirovanny teploizolyatsionnyy yestestvennogo tverdeniya [Dispersed-reinforced heat-insulating foam concrete of natural hardening]. *Izvestiya OrelGTU. Seriya "Stroitel'stvo. Transport"*. 2014. No. 2. Pp. 127-133.
7. Rimshin V.I., Kustikova Yu.O. Teoreticheskiye osnovy rascheta stsepleniya steklobazal'toplastikovoy armatury s betonom [Theoretical foundations for calculating the adhesion of glass-basalt-plastic reinforcement with concrete]. *Izvestiya OrelGTU. Seriya "Stroitel'stvo. Transport"*. 2009. No. 2/22 (554). Pp. 29-34.
8. Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Rozina V.Ye., Buyantuev S.L., Bardakhanov S.P. Increased corrosion resistance of basalt reinforced cement compositions with nanosilica. *Nanotehnologii v stroitel'stve* Nanotechnologies in Construction. 2014. Vol. 6. no. 4. Pp. 15-29. Available at: http://nanobuild.ru/en_EN.
9. Kustikova Yu.O. Issledovaniye svoystv bazal'toplastikovoy armatury i yeye stsepleniya s betonom [Investigation of the properties of basalt-plastic reinforcement and its adhesion to concrete]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovaniye*. 2014. No. 1. Art. 1 Access mode: <http://www.nso-journal.ru>.
10. Kychkin A.K., Vasilyeva A.A. Issledovaniye fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik kompozitsionnykh armaturnykh sterzhney, izgotovlennykh na osnove bazal'tovogo roving [Investigation of physical and mechanical characteristics of composite reinforcing bars made on the basis of basalt roving]. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova*. 2012. T. 9.No. 3.Pp. 80-85.
11. Saraikina K.A., Golubev V.A., Yakovlev G.I., Senkov S.A., Politaeva A.I. Nanostrukturirovaniye tsementnogo kamnya pri dispersnom armirovanii bazal'tovym voloknom [Nanostructuring of cement stone with dispersed reinforcement with basalt fiber]. *Stroitel'nyye materialy*. 2015. No. 2. Pp. 34-38. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2015-722-2-34-38>
12. Starovoitova I.A., Zyкова E.S., Suleimanov A.M., Semenov A.N., Mishurova M.V. Izucheniye fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik nanomodifitsirovannogo bazal'tovogo rovinga i kompozitsionnogo materiala na yego osnove [Study of physical and mechanical characteristics of nanomodified basalt roving and composite material based on it]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2016. No. 3 (37). Pp. 217-224.
13. Stupishin L.Yu., Savelyeva E.V., Masalov A.V., Pochernyaev D.A. Issledovaniye prochnostnykh kharakteristik kompozitsionnoy armatury na osnove bazal'tovoy kompleksnoy niti [Investigation of the strength characteristics of composite reinforcement based on basalt complex thread]. "Modern technologies of composite materials", Materials of the II youth scientific-practical conference with international participation, Ufa: RIC BashSU, 2016. P. 67-70.
14. Stupishin L.Yu., Masalov A.V., Savelyeva E.V. Kompozitsionnyy armaturnyy sterzhen' na osnove bazal'tovoy kompleksnoy niti [Composite reinforcing bar based on basalt filament]. Utility model patent RUS 170083 10/31/2016.
15. Stupishin L.Yu. Variatsionnyy kriteriy kriticheskikh urovney vnutrenney energii deformiruyemogo tela [Variational criterion of critical levels of internal energy of a deformable body]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2011. No. 8. Pp. 21-23.
16. Harun M., Koroteev D.D., Dhar P., Zhdero S., Elroba Sh.M. Fiziko-mekhanicheskiye svoystva bazal'to-voloknistogo vysokoprochnogo betona [Physical and mechanical properties of high-strength basalt-fibrous concrete] // *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy*. 2018. Vol. 14.No.5. Pp. 396-403. DOI: 10.22363 / 1815-5235-2018-14-5-396-403
17. Karavaev I.V., Rummyantseva V.E. K voprosam metodiki provedeniya ispytaniy ankerovki armatury nemetallicheskoй kompozitnoy v betone [On the methodology for testing anchoring of non-metallic composite reinforcement in concrete]. *Building and reconstruction*. 2015. No (57) Pp. 108-114.
18. Perechesova AD, Solovieva GA Osobennosti ispytaniya na rastyazheniye aramidnykh nitey [Features of tensile testing of aramid threads], *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2016. T. 82.No. 10. Pp. 66-70.
19. Khozin V.G., Kuklin A.N. Osobennosti ispytaniy i kharakter razrusheniya polimerkompozitnoy armatury [Features of tests and the nature of failure of polymer composite reinforcement]. *Magazine of civil engineering*. 2014. No. 3. Pp. 40-50.
20. Stupishin L. Yu., Savelyeva E.V., Emelyanov S.G., Altuhov F.V. Tensile Test Method for Basalt Roving // *Key Engineering Materials*. 2019. Vol. 821. Pp 506-511.
21. Harun M., Koroteev D.D., Jovich M., Volkov E.A. Parametry mekhaniki razrusheniya bazal'to-voloknistogo vysokoprochnogo betona [Parameters of fracture mechanics of high-strength basalt fiber concrete]. *Building and reconstruction*. 2018.No. 5 (79). Pp. 112-124.

Информация об авторах:

Ступишин Леонид Юлианович

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

кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры теоретической и строительной механики.

E-mail: StupishinLYU@mgsu.ru

Масалов Александр Васильевич

ФГБОУ ВО «Юго – Западный государственный университет», г. Курск, Россия,

кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства.

E-mail: masalow.al@yandex.ru

Савельева Екатерина Владимировна

ФГБОУ ВО «Юго – Западный государственный университет», г. Курск, Россия,

аспирант.

E-mail: katyasavelkursk@yandex.ru

Information about authors:

Stupishin Leonid Yu.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

candidate of Technical Science, prof., Professor of the Department of Theoretical and Civil Mechanics.

E-mail: StupishinLYU@mgsu.ru

Masalov Alexandr V.

South-West State University, Kursk, Russia,

candidate of Technical Science, docent of the Department of Industrial and Civil Construction.

E-mail: masalow.al@yandex.ru

Saveleva Ekaterina V.

South-West State University, Kursk, Russia,

graduate student.

E-mail: katyasavelkursk@yandex.ru

В.И. ТРАВУШ¹, В.С. ФЕДОРОВ², О.А. МАКОВЕЦКИЙ²¹Институт ГОРПРОЕКТ, г. Москва, Россия²ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (РУТ-МИИТ), Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СПЛОШНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО СТРУКТУРНОГО ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МАССИВА - РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО ЭКРАНА

Аннотация. В современной ситуации развития подземного пространства городов основной задачей становится обеспечение безопасности и сохранение нормального режима эксплуатации как строящегося здания, так и существующих зданий и сооружений, расположенных в зоне влияния нового строительства. В статье рассматривается конструкция разделительного экрана в виде сплошного вертикального геотехнического массива, выполненного из грунтобетонных элементов. Проведен анализ существующих аналитических и численных методов статического расчета таких конструкций. Предлагается расчетная модель конструкции экрана в виде пластины, свободно лежащей на двухпараметрическом упругом основании и находящейся под воздействием распределенной произвольной нагрузки. Выполнено расчетное моделирование работы разделительного экрана на стадии эксплуатации здания. Определены основные факторы, влияющие на распределение внутренних усилий в конструкции экрана.

Ключевые слова: геотехнический массив; грунтобетонный элемент; давление грунта; горизонтальное перемещение; двухпараметрическое грунтовое основание.

V.I. TRAVUSH¹, V.S. FEDOROV², O.A. MAKOVETSKIY²¹GORPROEKT Institute, Moscow, Russia²Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

MODELING THE BEHAVIOR OF A CONTINUOUS VERTICAL STRUCTURAL GEOTECHNICAL SOLID - A DIVIDING SCREEN

Abstract. In the current situation of development of the underground space of cities, the main task is to ensure safety and maintain the normal operation of both the building under construction and existing buildings and structures located in the zone of influence of new construction. The article considers the design of the dividing screen in the form of a continuous vertical geotechnical solid, made of jet-grouting elements. The analysis of existing analytical and numerical methods of static calculation of such structures is carried out. A computational model of the screen structure in the form of a plate lying freely on a two-parameter elastic base and being under the influence of a distributed arbitrary load is proposed. The calculated simulation of the dividing screen operation at the stage of building operation is performed. The main factors influencing the distribution of internal forces in the screen design are determined.

Keywords: geotechnical solid; jet-grouting element; soil pressure; horizontal displacement; two-parameter soil base.

1. Введение

Геотехнический массив - это слой грунта с модифицированными свойствами, создаваемый для улучшения условий работы подземной части здания или сооружения, предотвращающий или ограничивающий распространение некоего воздействия на среду [1-3]. Наиболее эффективный метод использования геотехнического массива - это создание слоя с заданными свойствами и физико-механическими характеристиками. Модификация свойств грунта может достигаться различными методами, исследуемый в данной работе - струйная цементация грунта [4,5]. Основное преимущество исследуемой технологии перед другими, применяемыми для устройства геотехнических массивов - это отсутствие ударных и динамических воздействий при производстве работ, следовательно возможность производства работ в плотной городской застройке.

В условиях плотной городской застройки вокруг строящейся подземной части здания выполняется конструкция сплошного вертикального структурного геотехнического массива, которая на период строительства выполняет роль ограждения котлована, воспринимая горизонтальное давление грунта, гидростатическое давление воды и нагрузки на бортах котлована и обеспечивая сохранность зданий окружающей застройки.

Конструкция выполняется из одного ряда секущихся грунтобетонных свай (например диаметром 800 мм с шагом 750 мм) или с расположением свай меньшего диаметра в два ряда в шахматном порядке (рисунок 1).

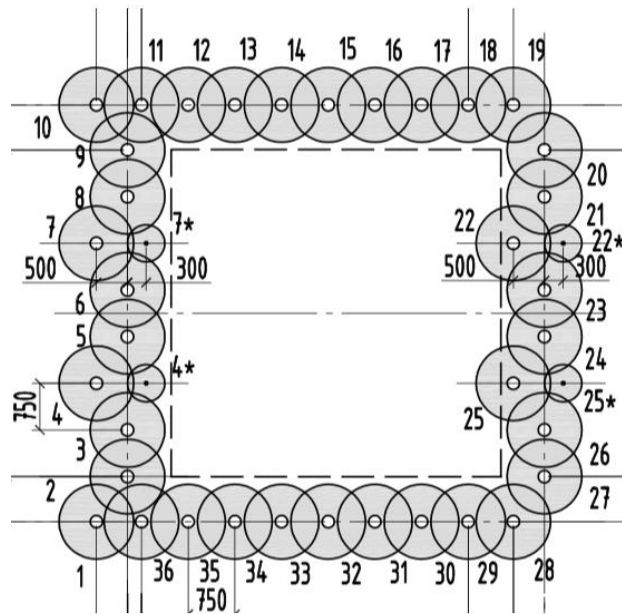


Рисунок 1- Конструкция сплошного вертикального структурного геотехнического массива

В период эксплуатации здания, эта конструкция выполняет роль разделительного экрана, ограничивая воздействие на существующие здания и сооружения и обеспечивая при этом сохранность внутреннего подземного пространства здания.

2. Анализ методов расчета гибких вертикальных геотехнических массивов

При расчетах гибких подпорных стен применяются аналитические методы на основе теории предельного равновесия и численные методы (например, с применением процедуры метода конечных элементов, используя нелинейные модели сплошных сред или нелинейные контактные модели, выбираемые в зависимости от типа грунтов и конструктивных особенностей сооружения. Именно расчетный метод или расчетная модель, которые позволяют оценить поведение вертикального геотехнического массива, при тех или иных исходных данных, в большей степени определяет ход решения задачи.

Аналитические методы расчета разрабатывались на протяжении более 100 лет российскими и зарубежными учеными [6-8]. В соответствии с требованиями российских норм при использовании для расчетов гибких подпорных стен аналитических методов теории предельного равновесия рекомендуется принять следующие схемы расчета: схема свободного опирания стены (схема Э.К. Якоби); схема заделанной стены (схема Блюма-Ломейера); метод местных упругих деформаций (метод коэффициента постели).

Численное моделирование конструкции под нагрузкой имеет важные преимущества: оно стремится к физическому правдоподобию и это позволяет использовать модель для исследований эксплуатационной надежности, что может предоставить довольно реальную информацию о деформациях, которые также связаны с исследуемыми задачами окончательного предельного состояния (ОПС) [9]. Опыт расчетов стен глубоких котлованов

с применением численных методов, реализованных в геотехнических программных комплексах, изложен в работах [10-14].

3. Расчетная модель сплошного вертикального геотехнического массива

При проектировании сплошного вертикального геотехнического массива предлагаемое аналитическое решение будем рассматривать как базовое, по отношению к численным методам расчета, определяющее достоверность полученных результатов.

Как правило, тонкую подпорную стенку рассматривают как статически определимую балку, имеющую опору в основании и находящуюся в статическом равновесии вследствие уравновешенного активного и пассивного давлений грунта. Задача расчета состоит в определении глубины анкеровки и жесткости сечения.

Такое упрощение статической схемы при моделировании вертикального массива дает неадекватное представление о действительной работе сооружения. О наличии резервов прочности говорит то, что зафиксированная несущая способность массива на ряде экспериментальных площадок значительно превосходила теоретическую, а в практике эксплуатации таких сооружений не отмечено развитие непроектных деформаций даже под нагрузками, превышающими проектные.

Поэтому в предлагаемой расчетной модели вертикальный массив рассматривается как пластина, свободно лежащая на двухпараметрическом упругом основании и находящаяся под воздействием распределенной произвольной нагрузки $q(x, y)$. Грунтовое основание принято в виде двухпараметрической модели П.Л. Пастернака [15]: c_1 - коэффициент сжатия, связывающий интенсивность вертикального отпора упругого основания (грунта) с его осадкой, Н/м³; c_2 - независимый от c_1 коэффициент сдвига, связывающий интенсивность вертикальной силы сдвига и производную перемещения в соответствующем направлении, Н/м. Алгоритм приближенного решения в рядах для определения прогиба прямоугольной пластины на двухпараметрическом упругом основании предложен в работе [16].

Дифференциальное уравнение изгиба пластины имеет вид:

$$D_1 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2D_3 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_2 \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + c_1 w - c_2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = q(x, y) \quad (1)$$

где $D = Eh^3/(12(1 - \mu^2))$ - цилиндрическая жесткость пластины; E, μ - упругие характеристики материала пластины; h - толщина сечения материала пластины.

Функцию прогибов, по обобщённому алгоритму Власова – Канторовича запишем в виде двойного ряда:

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N w_{mn} X_m(x) Y_n(y) \quad (2)$$

где w_{mn} - коэффициенты ряда; $X_m(x) Y_n(y)$ - фундаментальные балочные функции, задаваемые в зависимости от краевых условий.

Требуемые балочные функции определяются решениями уравнения поперечных колебаний балки:

$$\frac{d^4 X(x)}{dx^4} - \alpha^4 X(x) = 0 \quad (3)$$

где α - параметр, определяемый частотой собственных колебаний балки.

При приложении к пластине, свободно лежащей на упругом двухпараметрическом основании распределенной нагрузки, по периметру возникают погонные поперечные силы переменной интенсивности, определяемой величиной перемещения точки контура.

В этом случае краевые условия для балочных функций можно представить в виде:

$$\begin{cases} kX(0) = -D \frac{\partial^3 X(x)}{\partial x^3} \Big|_{x=0}, kX(l) = -D \frac{\partial^3 X(l)}{\partial x^3} \Big|_{x=l}; \\ \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} \Big|_{x=0} = 0, \frac{\partial^2 X(l)}{\partial x^2} \Big|_{x=l} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Общее выражение для балочной функции имеет вид:

$$X_i(x) = \frac{1}{2} [(1 - \psi)sh \propto x - [(1 + \psi)]sin \propto x - \beta(ch \propto x + cos \propto x)], i \geq 1 \quad (5)$$

где

$$\psi = -\frac{sh\lambda + sin\lambda - \beta(ch\lambda - cos\lambda)}{sh\lambda - sin\lambda}; \lambda = \propto l; \beta = D \frac{\propto^3}{k}; k = \sqrt{c_1 c_2} \quad (6)$$

Для поиска коэффициентов ряда w_{mn} используется метод Галеркина и в этом случае выражение (2) получает вид:

$$\begin{aligned} w_{ij} [D_1 c_{ii} d_{jj} + 2D_3 b_{ii} e_{jj} + D_2 a_{ii} f_{jj} + c_1 a_{ii} d_{jj} - c_2 (b_{ii} d_{jj} + a_{ii} e_{jj})] \\ = - \int_0^a \int_0^b q(x, y) X_i(x) Y_j(y) dx dy \end{aligned} \quad (7)$$

При заданных геометрических параметрах пластины и упругого основания, коэффициенты в левой части уравнения являются постоянными и значение коэффициентов ряда определяются законом приложения распределенной нагрузки $q(x, y)$. Интеграл правой части вычисляется либо аналитические, либо численно, в зависимости от сложности функции нагрузки $q(x, y)$. Используя найденные коэффициенты и выражение (2) можно определить значение прогибов в любой точке (x, y) . В этом случае выражение (2) принимает вид:

$$\begin{aligned} w(x, y) = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} w_{i,j} \left(\frac{\beta_1}{2} (sin \alpha_1 x - cos \alpha_1 x) - sin \alpha_1 x \right) \times \\ \times \left(\frac{\beta_2}{2} (sin \alpha_2 y - cos \alpha_2 y) - sin \alpha_2 y \right) \end{aligned} \quad (8)$$

Усилия в сечении пластины определяем исходя из выражения:

$$M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right); M_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right); \quad (9)$$

4. Пример расчетного моделирования сплошного вертикального массива

Выполним моделирование вертикального геотехнического массива в виде квадратной пластины с размерами $b = 10,0$ м, $h = 10,0$ м и толщиной $d = 0,6$ м. Материал пластины - грунтобетон (модуль деформации $E = 200$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,35$). Грунтовое основание задано коэффициентами пропорциональности $C_1 = 200$ т/м³; $C_2 = 2000$ т/м. К поверхности пластины приложена равномерно распределенная нагрузка интенсивностью $q(x, y) = 20$ т/м², на площадке ограниченной координатами (x, y) : (1.0, 3.0; 9.0, 3.0; 1.0, 9.0; 9.0, 9.0) (рисунок 2).

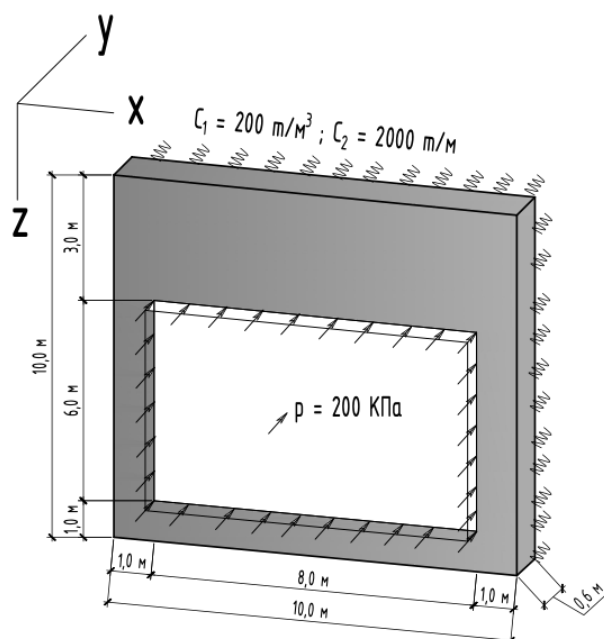


Рисунок 2 - Расчетная схема вертикального геотехнического массива

Такая схема работы вертикального геотехнического массива характерна для стадии эксплуатации надземной части здания. Значение горизонтальных перемещений и усилий в сечениях пластины определяем в характерных точках с шагом координат 1,0 м. Также выполним оценку влияния изменения упругих характеристик материала (модуль деформации $E=200,300,400$ МПа;) и деформационных характеристик основания (коэффициенты пропорциональности $C_1 = 200,250,300$ т/м³; $C_2 = 2000,2500,3000$ т/м) на развитие горизонтальных прогибов и изгибающих моментов в вертикальном сечении пластины, проходящем через ее центр. Результаты определения горизонтальных перемещений и изгибающих моментов в сечениях пластины приведены в виде графиков на рисунках 3 - 5.

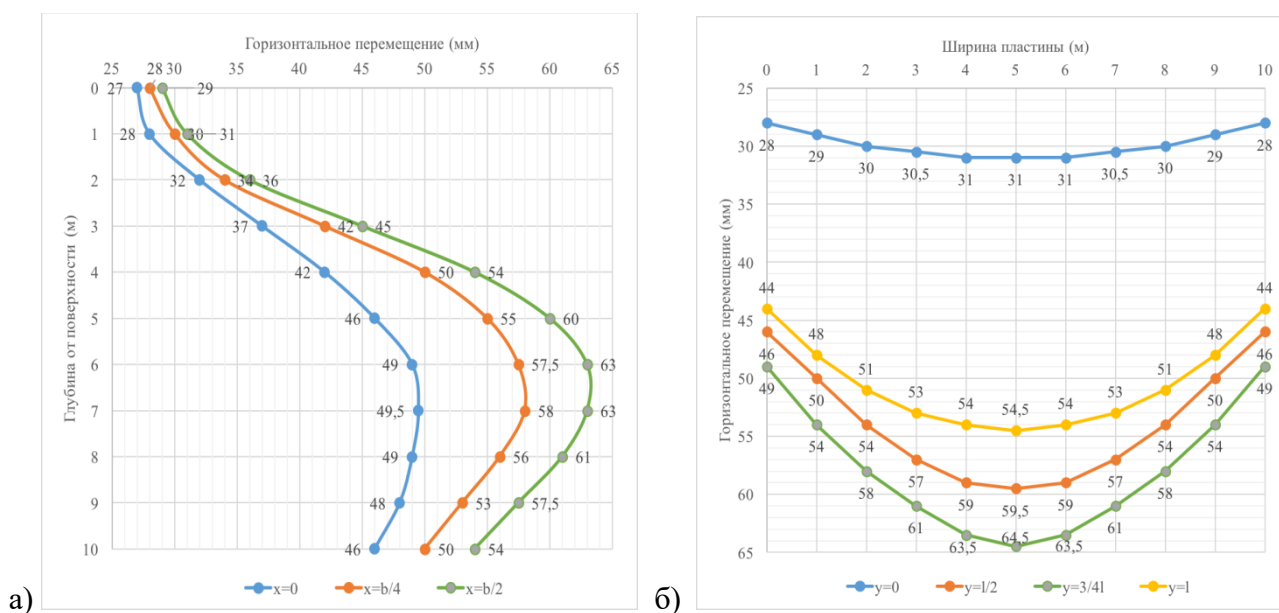


Рисунок 3 - Графики изменения горизонтальных перемещений в вертикальных (а) и горизонтальных (б) сечениях пластины (модуль деформации грунтобетона $E = 200$ МПа; коэффициент упругого основания $C_1 = 200$ т/м³)

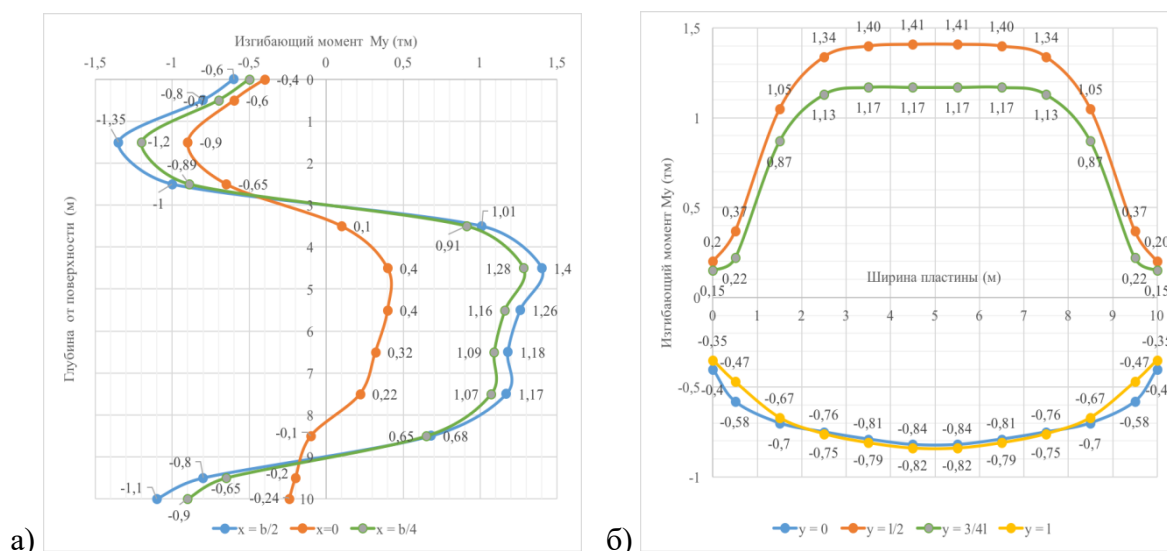


Рисунок 4 - Графики распределения изгибающего момента M_y (тм) в вертикальных (а) и горизонтальных (б) сечениях пластины (модуль деформации грунтобетона $E = 200$ МПа; коэффициент упругого основания $C_1 = 200$ т/м³)

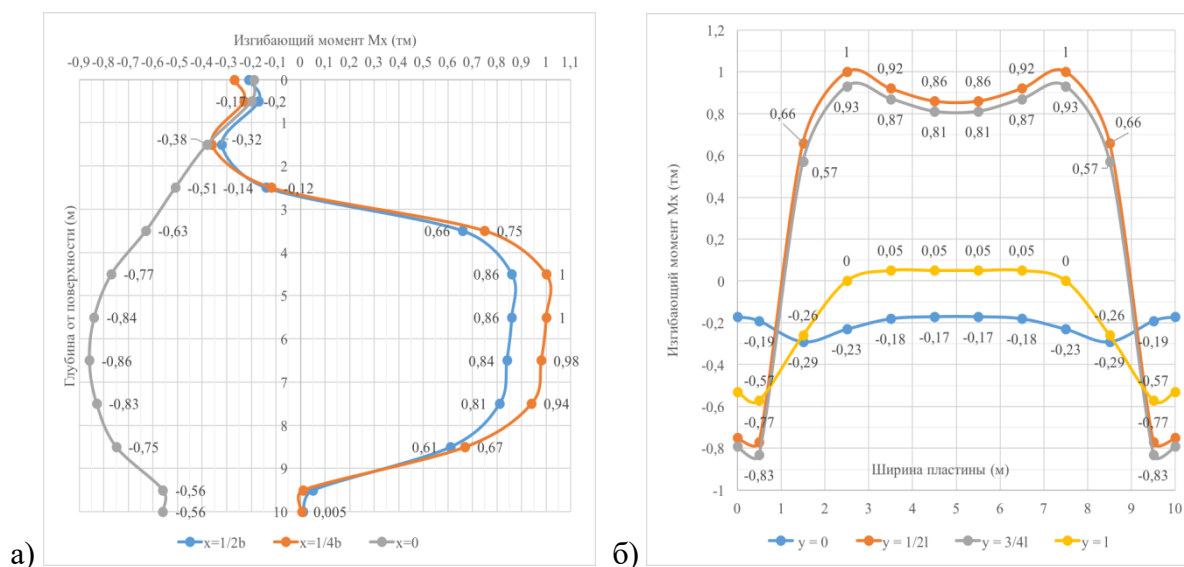


Рисунок 5 - Графики распределения изгибающего момента M_x (тм) в вертикальных (а) и горизонтальных (б) сечениях пластины (модуль деформации грунтобетона $E = 200$ МПа; коэффициент упругого основания $C_1 = 200$ т/м³)

5. Анализ результатов моделирования

Рассмотрение полученных результатов позволяет выделить следующие закономерности в развитии горизонтальных перемещений массива: качественная картина распределения горизонтальных перемещений достаточно сильно отличается от получаемой при классической расчетной схеме в плоской постановке. Величина перемещений в вертикальных сечениях в краевой зоне пластины на 21...28 % меньше на аналогичных глубинах по сравнению с центральной зоной. При пропорциональном увеличении коэффициента сжатия основания C_1 происходит нелинейное уменьшение абсолютной величины горизонтальных перемещений. Изменение жесткости пластины на величину перемещений практически не сказывается. Нарастание абсолютной величины горизонтальных перемещений (40...60 мм) происходит до глубины 6...7 метров (центр площадки приложения нагрузки), затем происходит его снижение. Скорость изменения величины перемещений максимальна (6...9 мм/м) в краевой зоне площадки приложения

нагрузки при минимальных значениях коэффициента пропорциональности C_1 . С увеличением коэффициента пропорциональности C_1 градиент скорости изменения горизонтальных перемещений снижается. Таким образом на развитие горизонтальных перемещений пластины наиболее сильное влияние оказывает изменение коэффициента пропорциональности основания.

Внутренние усилия в сечении пластины: Распределение изгибающих моментов M_y в вертикальных сечениях пластины имеет совпадающий качественный закон, и отличается в краевой зоне от центральной части только абсолютной величиной. Распределение изгибающих моментов M_x в вертикальной плоскости пластины имеет два характерных сечения на расстоянии $\frac{1}{4} b$ от краев пластины с максимальным значением величины изгибающего момента. Абсолютное значение изгибающего момента M_y во всех сечениях пластины превышает абсолютное значение изгибающего момента M_x в 1,35...1,5 раза. Распределение изгибающего момента M_y по глубине пластины имеет два характерных сечения: минимальное значение на глубине $0,15h$ от поверхности (середина ненагруженной зоны пластины) и максимальное значение на глубине $0,45h$ от поверхности. При минимальном значении варьируемых параметров (деформационных характеристик - материала пластины и основания) абсолютные значения минимального и максимального моментов отличаются в пределах 3...4 %, с ростом коэффициента пропорциональности основания C_1 , минимальное значение начинает превышать максимальное на 15...17 %. Увеличение модуля деформации материала пластины приводит к возрастанию абсолютной величины изгибающего момента. При увеличении модуля с 200 до 300 МПа, момент возрастает в 1,35...1,5 раза; при увеличении с 300 до 400 МПа коэффициент возрастания снижается до диапазона 1,2...1,33. Распределение коэффициента возрастания изгибающего момента с глубиной имеет два характерных (экстремальных) сечения на глубине $0,15h$ (совпадает с абсолютным минимумом момента) и $0,575h$ от поверхности.

6. Выводы

Анализ полученных закономерностей показывает, что для моделирования работы вертикального геотехнического массива на стадии возведения и эксплуатации надземной части здания наиболее важным является учет изменения как абсолютных величин, так и градиентов изменения горизонтальных перемещений и изгибающих момент в характерных сечениях. Значимым фактором является соотношение деформационных характеристик массива и окружающего его грунта. Влияние этих особенностей необходимо учитывать при постановке пространственной задачи компьютерного моделирования системы вертикальных геотехнических массивов, с учетом изменения геотехнической ситуации во времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шулятьев О.А., Мозгачева О.А. Вертикальный геотехнический барьер по методу компенсационного нагнетания. М.: 75 лет НИИОСП им. Н.М. Герсегонова. Сбор. науч. тр., 2006. С. 212-221.
2. Маковецкий О.А., Зуев С.С., Селетков С.Ф., Травуш В.И. Устройство системы вертикальных и горизонтальных геотехнических барьеров // Жилищное строительство. 2016. № 9. С. 40-44.
3. Астраханов Б.Н. Тенденции развития технологии устройства ограждения котлованов в условиях плотной городской застройки // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2002. №4. С. 4-8.
4. Бройд И.И. Струйная геотехнология. М.: Издательство АСВ, 2004. 448 с.
5. Ильичев В.А., Готман Ю.А., Назаров В.П. Расчетное обоснование использования JET-grouting для снижения дополнительных осадок существующего здания от строительства подземного многофункционального комплекса // Вестник гражданских инженеров. СПбГАСУ. 2009.
6. Бреннеке Л., Ломейер Э. Основания и фундаменты. Гостройиздат, 1933. 372 с.
7. Будин А.Я. Тонкие подпорные стенки. Л.: Стройиздат, 1974 г. 92 с.
8. Ренгач В.Н. Шпунтовые стенки. Ленинград: Стройиздат, 1970. 112 с.
9. Бондаренко В.М., Федоров В.С. Модели при решении технических задач // Перспективы развития строительного комплекса. 2014. С. 262-267.

10. Ильичев В.А., Коновалов П.А., Никифорова Н.С. Прогноз деформаций зданий вблизи котлованов в условиях плотной городской застройки Москвы // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2004. №4. С. 17-21.
11. Колыбин И.В., Фурсов А.А. Расчет подземных сооружений с учетом технологии их возведения // Подземное строительство России на рубеже XXI века. Труды конференции. 2000. С. 114-153.
12. Савицкий В.В., Шейнин В.И. Назначение граничных условий при расчетах МКЭ малозаглубленных подземных сооружений // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1996. №6. С. 14-17.
13. Simson B., Powrie W. Embedded retaining walls: theory, practice and understanding // Proceedings of the fifteenth international conference on soil mechanics and geotechnical engineering. V4. Istanbul, 2001. Pp. 2505-2522.
14. Barla M., Barla G., Semeraro F., Aiassa S. Slope stability analysis of an Italian case study with the strength reduction method // Proc. 11th International Conference of the International Association of Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG). Torino (Italy), 2005. Pp. 473-480.
15. Пастернак П.Л. Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели. М.: Госстройиздат, 1954. 56 с.
16. Большаков А.А. Прямоугольная пластина, упруго опертая по контуру // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая, 2011. Вып. 4(19).

REFERENCES

1. SHulyat'ev O.A., Mozgacheva O.A. Vertikal'nyj geotekhnicheskij bar'er po metodu kompensacionnogo magnetaniya [Vertical geotechnical barrier by the method of compensatory injection]. M.: 75 let NIIOSP im. N.M. Gersevanova. Sbor. nauch. tr., 2006. Pp.212-221.
2. Makoveckiy O.A., Zuev S.S., Seletkov S.F., Travush V.I. Ustrojstvo sistemy vertikal'nyh i gorizont'al'nyh geotekhnicheskikh bar'ero'v [Design of a system of vertical and horizontal geotechnical barriers] // *Zhishchnoe stroitel'stvo*. 2016. No.9. Pp. 40-44.
3. Astrahanov B.N. Tendencii razvitiya tekhnologii ustrojstva ograzhdeniya kotlovanov v usloviyah plotnoj gorodskoj zastroyki [Trends in the development of pit fencing technology in dense urban development] // *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov*. 2002. No.4. Pp.4-8.
4. Brojd I.I. Strujnaya geotekhnologiya [Jet Geotechnology]. M.: Izdatel'stvo ASV, 2004. 448 p.
5. Il'ichev V.A., Gotman YU.A., Nazarov V.P. Raschetnoe obosnovanie ispol'zovaniya JET-grouting dlya snizheniya dopolnitel'nyh osadok sushchestvuyushchego zdaniya ot stroitel'stva podzemnogo mnogofunkcional'nogo kompleksa [Design justification for the use of JET-grouting to reduce the additional sediment of an existing building from the construction of an underground multifunctional complex] // *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. SPbGASU, 2009.
6. Brenneke L., Lomejer E. Osnovaniya i fundamenti [Basis and foundations]. Goststrojizdat, 1933. 372 p.
7. Budin A.YA. Tonkie podpornye stenki [Thin retaining walls]. L.: Strojizdat, 1974. 192 p.
8. Rengach V.N. SHpuntovye stenki [Sheet pile walls]. Leningrad: Strojizdat, 1970. 112 p.
9. Bondarenko V.M., Fedorov V.S. Modeli pri reshenii tekhnicheskikh zadach [Models for solving technical problems] // *Perspektivy razvitiya stroitel'nogo kompleksa*. 2014. Pp.262-267
10. Il'ichev V.A., Konovalov P.A., Nikiforova N.S. Prognoz deformatsij zdaniy vblizi kotlovanov v usloviyah plotnoj gorodskoj zastroyki Moskvy [Forecast of deformations of buildings near ditches in conditions of dense urban development in Moscow], // *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov*. 2004. No.4 pp.17-21.
11. Kolybin I.V., Fursov A.A. Raschet podzemnyh sooruzhenij s uchetom tekhnologii ih vozvedeniya [Calculation of underground structures taking into account the technology of their construction] // *Podzemnoe stroitel'stvo Rossii na rubezhe XXI veka*. Trudy konferencii. 2000. Pp.114-153.
12. Savickij V.V., SHEjnin V.I. Naznachenie granichnyh uslovij pri raschetah MKE malozaaglublennyh podzemnyh sooruzhenij [Assignment of boundary conditions for FEM calculations of low-depth underground structures] // *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov*. 1996. No.6. Pp.14-17.
13. Simson B., Powrie W. Embedded retaining walls: theory, practice and understanding // Proceedings of the fifteenth international conference on soil mechanics and geotechnical engineering. V4. Istanbul, 2001. Pp.2505-2522.
14. Barla M., Barla G., Semeraro F., Aiassa S. Slope stability analysis of an Italian case study with the strength reduction method // Proc. 11th International Conference of the International Association of Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG). Torino (Italy), 2005. Pp. 473-480.
15. Pasternak P.L. Osnovy novogo metoda rascheta fundamentov na uprugom osnovanii pri pomoshchi dvuh koefficientov posteli [Fundamentals of a new method for calculating foundations on an elastic Foundation using two bed coefficients]. M.: Gosstrojizdat, 1954. 56 p.
16. Bol'shakov A.A. Pryamougol'naya plastina, uprugop opertaya po konturu [Rectangular plate, elastically supported along the contour] // *Internet-vestnik VolgGASU. Ser.: Politematicheskaya*, 2011. Vol. 4(19).

Информация об авторах:

Травуш Владимир Ильич

«Институт ГОРПРОЕКТ», Россия, Москва,

Академик РААСН, профессор, доктор технических наук, вице-президент Российской академии архитектуры и строительных наук, главный конструктор - заместитель генерального директора по науке.

E-mail: travush@mail.ru

Федоров Виктор Сергеевич

ФГАБОУ ВО «Российский университет транспорта», Россия, Москва,

Академик РААСН, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения».

E-mail: fvs_skzs@mail.ru

Маковецкий Олег Александрович

ФГАБОУ ВО «Российский университет транспорта», Россия, Москва,

Советник РААСН, доцент, кандидат технических наук, докторант кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения».

E-mail: omakovetskiy@gmail.com

Information about authors:

Travush Vladimir I.

GORPROEKT Institute, Moscow, Russia,

Full Member of the RAASN, Professor, doctor of technical sciences

Vice-President of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences

Chief constructor - Deputy General Director for science.

E-mail: travush@mail.ru

Fedorov Viktor S.

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Full Member of the RAASN, Professor, doctor of technical sciences,

Chief of the Department «Building structures, buildings and construction».

E-mail: fvs_skzs@mail.ru

Makovetskiy Oleg A.

Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Advisor RAASN, Associate Professor, candidate of technical sciences,

doctoral student of the Department " Building structures, buildings and construction».

E-mail: omakovetskiy@gmail.com

Т.А. ИЛЬЮЩЕНКО¹, В.И. КОЛЧУНОВ^{1,2}, С.С. ФЕДОРОВ²

¹Юго-западный государственный университет, г. Курск, Россия

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
г. Москва, Россия

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ПРЕДНАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РАМНО-СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ОСОБЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Аннотация. Приведены результаты экспериментально—теоретических исследований трещиностойкости, развития и раскрытия трещин фрагмента железобетонной рамы многоэтажного каркаса монолитного здания с предварительно напряженными ригелями на особое аварийное воздействие, вызванное внезапным удалением одного из несущих элементов. В качестве аварийного воздействия рассмотрено удаление средней колонны рамы. Анализ картины трещинообразования в рамах с предварительно напряженным ригелем до и после особого воздействия выполнен в сопоставлении с картиной трещинообразования ненапряженной конструкцией рамы. По приращениям ширины раскрытия трещин в ригеле определен коэффициент динамических догрузок в предварительно напряженных конструкциях рам от особого воздействия. Полученные результаты экспериментально-теоретических исследований трещиностойкости конструкций рам при рассматриваемых воздействиях могут быть использованы при разработке способов защиты каркасов монолитных многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения.

Ключевые слова: предварительное напряжение, железобетонный каркас здания, трещиностойкость, экспериментальные исследования, особое воздействие.

T.A. ILIUSHCHENKO¹, V.I. KOLCHUNOV^{1,2}, S.S. FEDOROV²

¹ South West State University, Kursk, Russia

² Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

CRACK RESISTANCE OF PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURE SYSTEMS UNDER SPECIAL IMPACT

Abstract. The results of experimental and theoretical researches of crack resistance, development and growth of cracks of a fragment of a reinforced concrete multi-storey frame of a monolithic building with prestressed beams for a special emergency impact caused by a sudden removal of one of the load-bearing elements are presented. Removal of the middle column of the frame was considered as an emergency impact. Analysis of the pattern cracking in the frames with a prestressed beam before and after a special impact is carried out against the pattern cracking in an unstressed frame structure. Based on the increments of cracks width in the beam, the coefficient of dynamic additional loading in prestressed frame structures from a special impact was calculated. The obtained results of experimental and theoretical researches of the crack resistance of frame structures in considered influences can be used in the development of methods for protecting the frames of monolithic multi-storey buildings against progressive collapse.

Keywords: prestressing, reinforced concrete building frame, crack resistance, experimental research, special impact.

Введение

В связи с введением в хозяйственный оборот в отечественной и зарубежной практике нормативной базы нового поколения по защите зданий сооружений от прогрессирующего обрушения [1-4] необходимы исследования по решению задач этой проблемы, направленные на совершенствование и создание новых способов защиты каркасов различных зданий от особых воздействий. Анализ известных научных публикаций по решению таких задач показал, что проведенные в России и за рубежом исследования по этому направлению, в том числе для зданий и сооружений с железобетонным каркасом, относятся в основном к ненапряженным конструктивным системам [5-19]. Работы, посвященные исследованию железобетонным конструктивным системам с преднапряженными конструктивными элементами, практически отсутствуют. Среди зарубежных исследований можно привести публикацию [20], в которой приведены результаты экспериментальных исследований рамно-стержневых систем с преднапряженными ригелями, определен коэффициент динамических догрузений для первых пиковых воздействий на конструкции с преднапряженной и ненапряженной арматурой в ригелях системы и проведено их сравнение.

В то же время, как показали эти исследования и анализ выполненный в публикации [21] использование преднапряжение как одного из способов защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения может стать достаточно эффективным при решении такой задачи. В связи с этим в настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований фрагмента многоэтажного железобетонного каркаса монолитного здания с преднапряженными ригелями на особое воздействие, вызванное внезапным удалением одного из несущих элементов. Были рассмотрены и решены следующие задачи:

- дан анализ методики и получены результаты экспериментальных исследований трещиностойкости, развития и раскрытия трещин рамно-стержневых фрагментов каркаса многоэтажного железобетонного монолитного здания с предварительно напряженными ригелями на особое аварийное воздействие, вызванное внезапным удалением одной из несущих колонн
- проведен анализ картины трещинообразования предварительно напряженной рамы в сопоставлении с ненапряженной рамой после воздействия, вызванного внезапным выключением из работы центральной стойки;
- по экспериментальным значениям приращений ширины раскрытия трещин вычислен коэффициент динамических догрузений в предварительно напряженных конструкциях рам.

Анализ методики исследований. Для решения сформулированных задач была разработана методика и проведены экспериментальные исследования конструкции предварительно напряженных железобетонных рам, моделирующих фрагмент каркаса многоэтажного здания. Испытано две серии рам: РЖ-1 – рама с внезапно выключающейся центральной стойкой; РЖ-2 – рама с внезапно выключающейся крайней стойкой.

Конструкции рам были выполнены из бетона класса В40. Ригели рам армированы в верхней и нижней зонах по высоте сечения рабочей арматурой в виде одного стержня диаметром 8мм класса А500 (рисунок 1). Ригель над первым этажом рамы с целью ее защиты от прогрессирующего обрушения был выполнен предварительно напряженным. Предварительно напряженная арматура устанавливалась в верхней и нижней зонах из стержня диаметром 8 мм класса А600. Поперечная арматура ригелей принята из проволоки диаметром 2мм шагом 50мм и 100мм. Такое армирование назначено по результатам расчета опытных конструкций рам на проектную испытательную нагрузку в виде сосредоточенных сил P_i приложенных попарно к каждому ригелю симметрично на расстоянии 300мм от колонн.

Нагружение сосредоточенными силами производилось до уровня эксплуатационной нагрузки с коэффициентом надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,0$. Особое запроектное

воздействие моделировалось внезапным удалением центральной - для рамы РЖ-1 и крайней колонны - для рамы РЖ-2 первого этажа рамы с помощью рычажно-подвесной системы, выполненной по патенту [22].

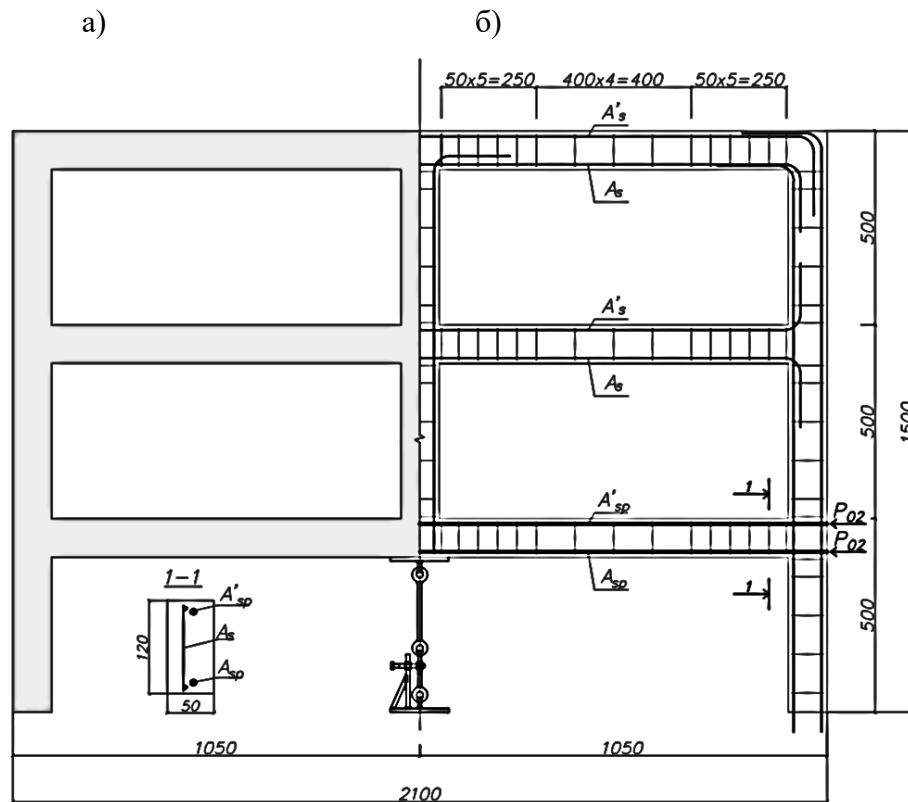


Рисунок 1 - Схема опалубки (а) и армирования (б) конструкции рамы

До начала испытаний был выполнен расчет напряженно-деформированного состояния опытных конструкций рам. Расчет проводился с использованием программного комплекса ЛИРА САПР по первичной и вторичной расчетным схемам разных уровней. Расчет по первичной расчетной схеме на действие заданной испытательной нагрузки в виде двух сосредоточенных сил в каждом пролете ригеля был выполнен в двух вариантах, с применением стержневых конечных элементов (рисунок 2а) и с применением объемных конечных элементов (рисунок 2б).

Предварительное напряжение в арматурном стержне моделировалось в первом случае приложением к стержневым элементам по концам ригелей продольной сжимающей силы, равной суммарной в верхнем и нижнем арматурном стержнях силе обжатия. Во втором варианте при использовании объемных конечных элементов преднапряжение учитывалось приложением продольной силы обжатия в центре соответствующего объемного конечного элемента, так называемого представительного объема по методике, предложенной в работе [23].

Расчет по вторичной расчетной схеме выполнен на суммарное действие испытательной нагрузки в виде двух сосредоточенных сил в каждом пролете ригеля и особого воздействия, вызванного удалением центральной стойки рамы. Удаление центральной стойки рамы в соответствии с [1] в расчетной схеме моделировалось приложением с обратным знаком реакции в этой стойки, определенной расчетом по первичной расчетной схеме.

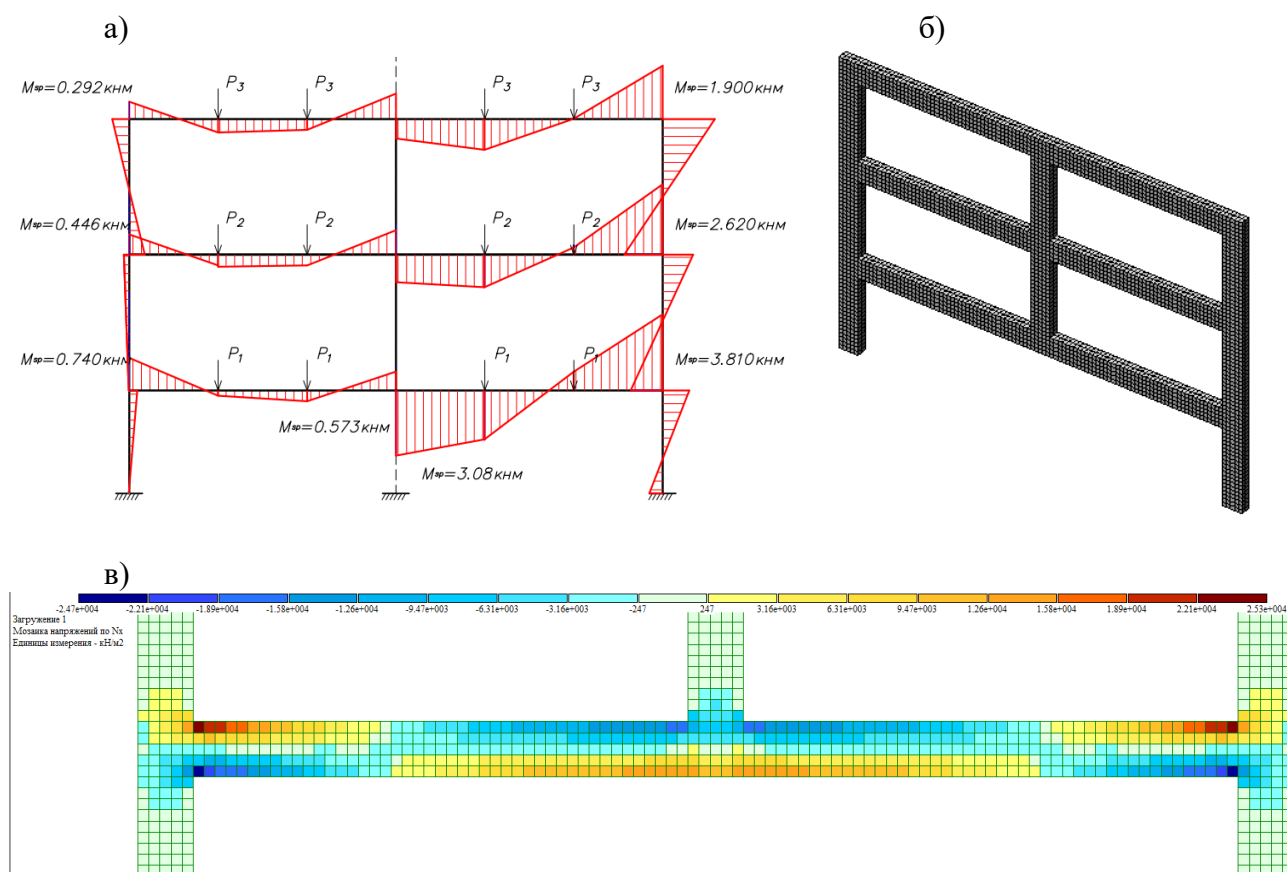


Рисунок 2 - Эпюры моментов для рамы с предварительно напряженным ригелем ($M_{\text{сп}}$): слева - до выключения центральной колонны, справа - после выключения центральной колонны (а); объемная конечно-элементная модель рамы (б), мозаика распределения продольных напряжений (усилий) в предварительно напряженном ригеле над первым этажом рамы (в)

Результаты экспериментальных исследований.

Анализируя полученный в конструкциях рам характер образования, раскрытия и развития трещин можно отметить следующее.

На первом этапе испытаний в преднапряженной конструкции рам РЖ-1 при нагружении суммарной проектной нагрузки $\sum P_{i,\text{max}}$ первые трещины (рисунок 3) были обнаружены в приопорных зонах ригелей второго этажа у центральной колонны при суммарной нагрузке $\sum P_i = 19,96$ кН. Соответственно моменты образования этих трещин составили 0,59 и 0,56 кНм. По мере увеличения нагрузки до уровня $\sum P_i = 23,64$ кН появились новые трещины в приопорном сечении ригелей над первым этажом и над вторым этажом у крайних колонны. На этапе нагружения проектной нагрузкой видимые нормальные трещины в ригелях рамы не образовались.

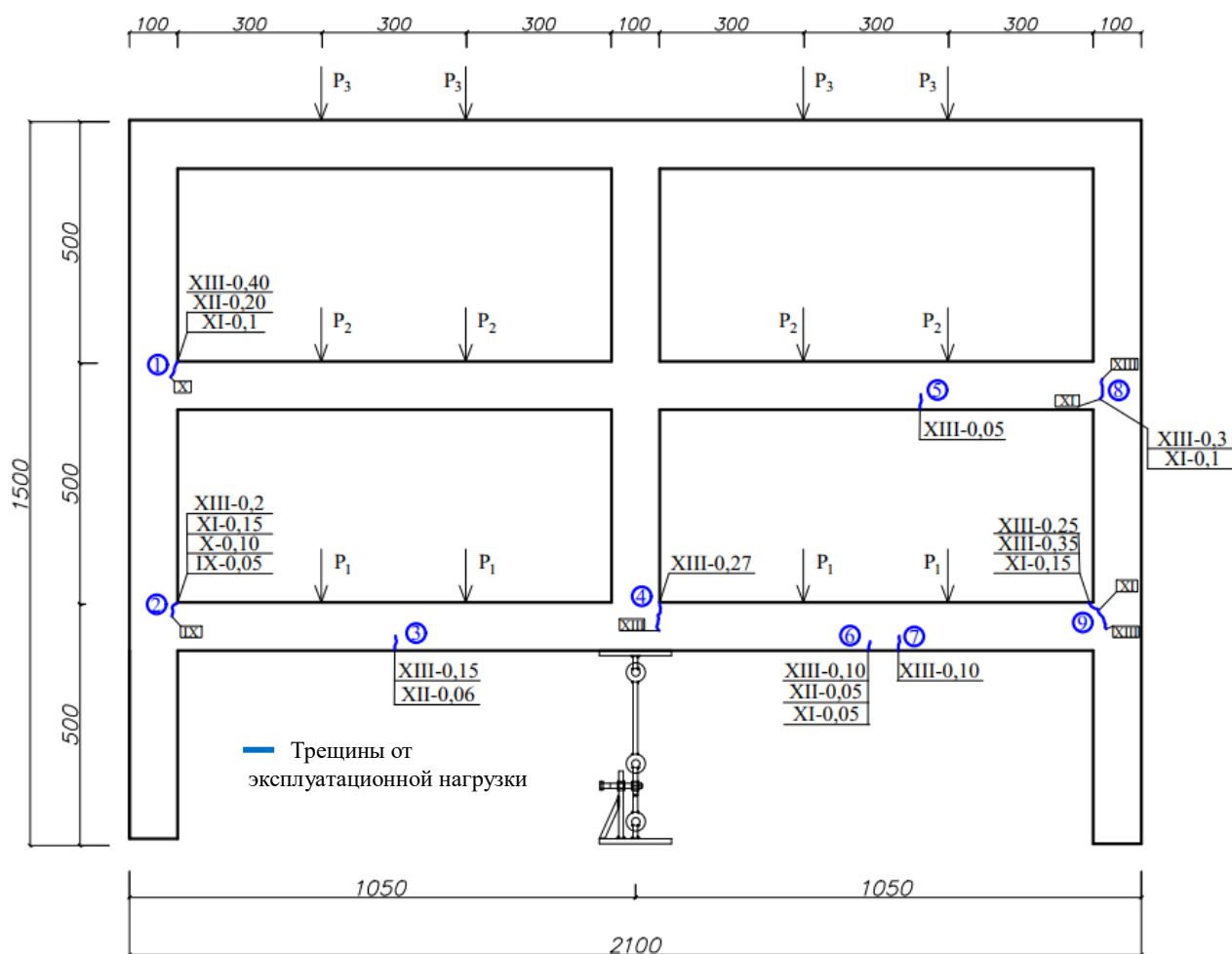


Рисунок 3 - Схема образования и ширина раскрытия трещин всех типов в конструкции рамы РЖ-1 до приложения особой нагрузки

После запроектного воздействия, вызванного внезапным удалением центральной стойки, в раме РЖ-1 из-за структурной перестройки конструктивной системы произошло раскрытие ранее образовавшихся трещин 1-9 (см. рисунок 3), а также их приращение от динамических догрузений элементов конструктивной системы. Образовывались новые трещины в приопорных сечениях ригеля третьего этажа рамы, а также образовались нормальные трещины в ригелях всех этажей рамы. Наибольшая ширина раскрытия трещин после приложения особой нагрузки составила 2,0 и 2,09 мм в приопорных сечениях, но видимых разрушения опытная конструкция рамы не получила (рисунок 4).

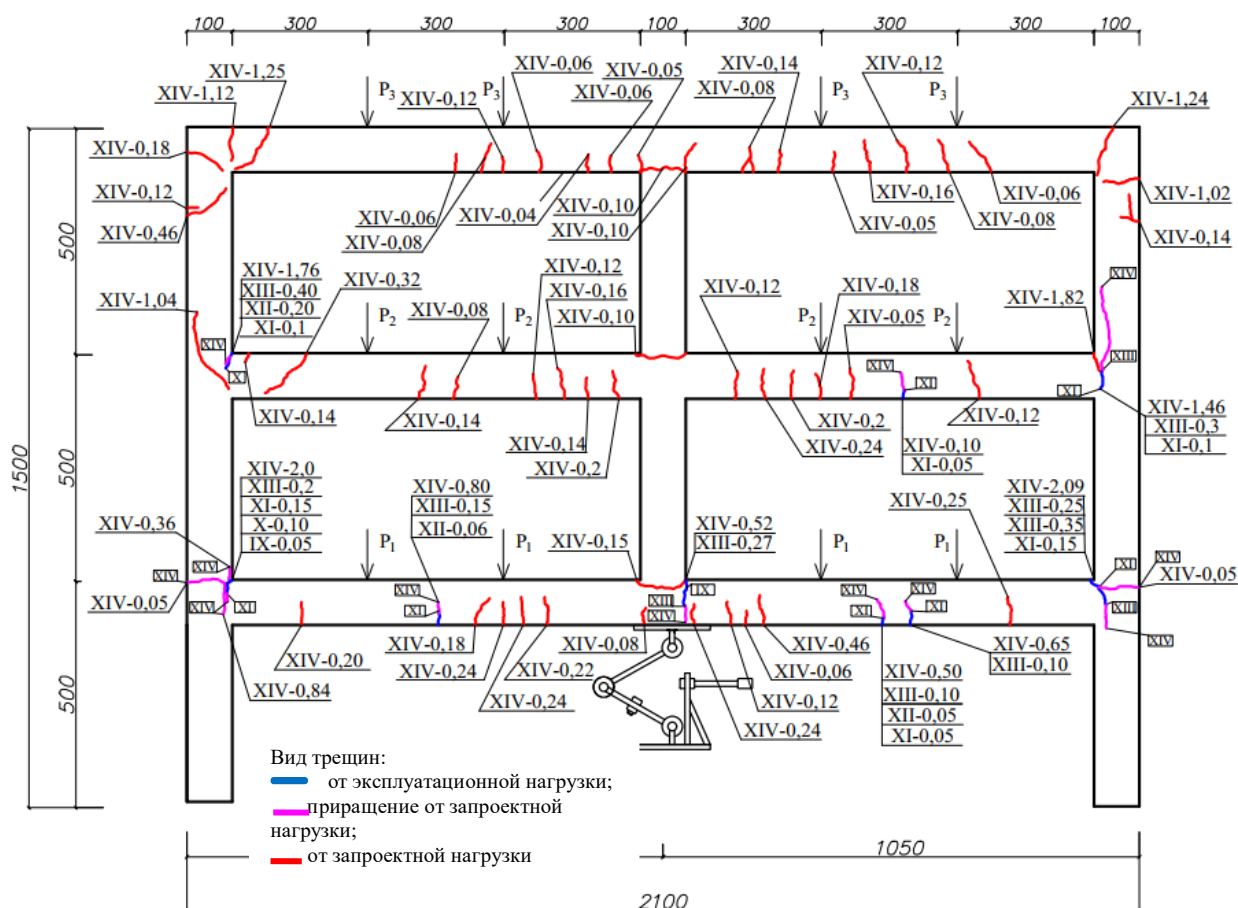
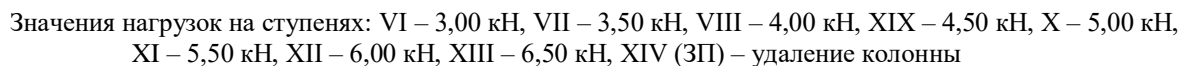


Рисунок 4 - Схема образования и ширины раскрытия трещин всех типов в конструкции рамы РЖ-1 после приложения особой нагрузки

Анализ количественного изменения ширины раскрытия трещин в ригелях рамы при проектной нагрузке и после особого запроектного воздействия (таблица 1) показал, что максимальные приращения получили трещины в зоне примыкания ригеля к крайней колонне (Тр-1, Тр-2, Тр-8, Тр-9). Используя эти данные был вычислен коэффициент динамического догружения сечений ригелей (θ_{ds}) от рассматриваемого запроектного воздействия как отношение максимальной ширины раскрытия трещины до и после запроектного воздействия.

Таблица 1 - Ширина раскрытия трещин всех типов

Стадия нагружения	Ширина раскрытия трещин всех типов $a_{сгс}$ по номеру трещины, мм									Примечание
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Рама серии РЖ-1										
*IX	0.05	-	-	-	-	-		-	-	Момент трещинообразования опытного образца
X	0.10	-	-	-	-	-		-	-	-
XI	0.15	0.15	-	-	0.05	0.05	-	0.10	0.15	-
XII	0.20	0.10	0.06	-	0.05	0.05	-	0.10	0.20	-
XIII	0.40	0.20	0.15	0.27	0.05	0.10	0.10	0.30	0.25	Перед удалением колонны
**XIV	1.76	2.00	0,80	0.52	0.10	0.50	0.65	1.46	2.09	После удаления колонны
Коэффициент динамических догрузений θ_{ds}	4,40	10.00	5,30	1,92	2.00	5,00	6,50	4.70	8,36	-



Так при опорном сечении ригеля и колонны первого, второго и третьего этажей в ненапряженной рамы наблюдалось раздробление бетона и фактически разрушение опорного узла. В предварительно напряженной раме критерии особого предельного состояния [1] не были достигнуты.

Сопоставляя ширину раскрытия трещин в ригелях над первым этажом и над вышележащими, можно отметить, что по мере повышения этажности ширина раскрытия трещин в ригелях существенно уменьшается. Так, максимальная ширина раскрытия трещин над первым при суммарном действии испытательной нагрузки в виде двух сосредоточенных сил в каждом пролете ригеля и особого воздействия, вызванного удалением центральной стойки рамы, составила 2,09 мм, а над третьим этажом 1,24 мм. Из этого можно сделать вывод о том, что установка преднапряженной арматуры в ригелях монолитных рам каркасов зданий над первым этажом может стать эффективным способом их защиты от прогрессирующего обрушения.

Анализ схем трещин рисунка 5 показывает, что при внезапном изменении силовых потоков в рамной конструкции вызванном удалением колонн первого этажа наиболее напряженными являются узлы сопряжения ригеля и колонны. Отсюда следует, что при проектировании защиты от прогрессирующего обрушения узлы сопряжения должны быть

дополнительно усилены отогнутыми арматурными стержнями, заводимыми из ригелей в колонну, или устройством в узлах примыкания ригелей к колоннам вут.

Выводы

1. Экспериментальными исследованиями рамно-стержневых фрагментов каркаса многоэтажного железобетонного монолитного здания с предварительно напряженными ригелями получены параметры трещиностойкости, развития и раскрытия трещин при особых аварийных воздействиях, вызванных внезапным удалением одной из несущих колонн.
2. Анализом опытных и расчетных значений ширины раскрытия трещин в рассматриваемых конструкциях предварительно напряженных железобетонных рам в сопоставлении с ненапряженными конструкциями рам установлено, что при внезапном изменении силовых потоков предварительное напряжение значительно снижает ширину раскрытия трещин и повышает предельную деформативность бетона наиболее напряженных сжатых зон конструктивной системы.
3. Рассчитанное по экспериментальным значениям приращений ширины раскрытия трещин коэффициента динамических догрузений в предварительно напряженных конструкциях рам, вычисленное как отношение ширины раскрытия трещин после запроектного воздействия к ширине раскрытия трещин до запроектного воздействия в пролетных сечениях, составило 6,5 и 5,0. В ненапряженных конструкциях этот коэффициент составил 4,2 и 2,9 соответственно. Это свидетельствует о заметном влиянии предварительного напряжения на демпфирующие свойства рассматриваемых конструкций.
4. Полученные результаты экспериментально-теоретических исследований трещиностойкости предварительно напряженных конструкций рам могут быть использованы при разработке способов защиты каркасов монолитных многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения / 385.1325800.2018. СП – М.: Минстрой России, 2018. 33с.
2. UFC 4-023-03. Unified Facilities Criteria (UFC). Design of Buildings to Resist Progressive Collapse Text. Department of Defense USA, 2010. - 176 p
3. GSA. Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance, Washington, D.C., October, 2016. 203 p.
4. ДБН В.1.2-14-2009. Общие принципы обеспечения надежности и конструктивной безопасности зданий, сооружений строительных конструкций и оснований. К.: Минрегионстрой Украины, 2009. 43 с
5. Бондаренко В.М., Колчунов В.И., Воробьев Е.Д., Римшин В.И., Осовских Е.В., Доценко В.Н., Творогова М.Н. О расчете сборно-монолитных железобетонных каркасов зданий // Бетон и железобетон в Украине. 2004. №1(19). С.2-7.
6. Демьянов А.И. Алькади С.А. Экспериментально-теоретические исследования статико-динамического деформирования пространственной железобетонной рамы со сложноподпряженными ригелями сплошного и составного сечения // Промышленное и гражданское строительство – 2018. – № 6 – 68–75с
7. Деркач В.Н. Совместная работа каменного заполнения и железобетонного монолитного каркаса // Инженерно-строительный журнал. 2013. №5(40). С. 20–27.
8. Емельянов С.Г., Ключева Н.В., Кореньков П.А. Методика определения параметров живучести железобетонных каркасов многоэтажных зданий. Известия высших учебных заведений // Технология текстильной промышленности. 2016. № 3 (363). С. 252-258.
9. Ключева Н. В., Андросова Н. Б. Живучесть железобетонных рам с односторонними связями // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. 2007. №. 2-14. С. 50-55.
10. Расторгуев Б. С., Плотников А. И. Расчет несущих конструкций монолитных железобетонных зданий на прогрессирующее разрушение с учетом динамических эффектов // Сб. науч. тр. Института строительства и архитектуры МГСУ. М., 2008. С. 65–72

11. Федорова Н.В., Кореньков П.А. Статико-динамическое деформирование монолитных железобетонных каркасов зданий в предельных и запредельных состояниях // Строительство и реконструкция. 2016. №. 6. С. 90-100.
12. Федорова Н.В., Фан Д.К., Нгуен Т.Ч. Экспериментальные исследования живучести железобетонных рам с ригелями, усиленными косвенным армированием // Строительство и реконструкция. 2020. №. 1. С. 92-100.
13. Trekin N.N., Kodysh E.N., Kelasiev N.G., Shmakov S.D., Chaganov A.B., Terehov I.A. The improvement of protection methods from the progressive collapse of one-storey industrial buildings // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019. T. 1425. №. 1. C. 012050.
14. Alogla K.D., Alogla L., Weekes L., Augusthus Nelson. Theoretical assessment of progressive collapse capacity of reinforced concrete structures // Mag. Concr. Res. 2017. № 69(3). C. 145–162.
15. Helmy H., Salem H., Mourad S. Progressive collapse assessment of framed reinforced concrete structures according to UFC guidelines for alternative path method // Engineering Structures. 2012. T. 42. P. 127-141.
16. Mohajeri Nav F. Analytical investigation of reinforced concrete frames under middle column removal scenario / F. Mohajeri Nav, U. Nima, R. Abbasnia // Adv. Struct. Eng. 2018. № 21.9. C. 1388–1401.
17. Pham A. T., Tan K. H. Experimental study on dynamic responses of reinforced concrete frames under sudden column removal applying concentrated loading // Engineering Structures. 2017. T. 139. Pp. 31-45.
18. Rahai A. et al. Progressive collapse assessment of RC structures under instantaneous and gradual removal of columns //Advances in Structural Engineering. 2013. T. 16. №. 10. P. 1671-1682.
19. Tsai M. H., Zhuang W. B. An Analytical Approach for the Flexural Robustness of Seismically Designed RC Building Frames Against Progressive Collapse //International Journal of Civil Engineering. 2020. T. 18. P. 1025-1037.
20. Yang T., Chen W., Han Z. Experimental investigation of progressive collapse of prestressed concrete frames after the loss of middle column //Advances in Civil Engineering. 2020. T. 2020
21. Федорова Н.В., Халина Т.А. Исследование динамических догружений в железобетонных конструктивных системах при внезапных структурных перестройках // Промышленное и гражданское строительство. 2017. №5. С. 32-36
22. Патент 2642542 Российской Федерации. Устройство для экспериментального определения динамических догружений в рамно-стержневых конструктивных системах / Н. В. Ключева, П. А. Кореньков; заявитель и патентообладатель КФУ; опубл. 29.01.2018
23. Колчунов В.И., Яковенко И.А., Ключева Н.В. Метод физических моделей сопротивления железобетона //Промышленное и гражданское строительство. 2013. №. 12. С. 51-55
24. Fedorova N.V., Ngoc V.T. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019. T. 1425. №. 1. C. 012033.

REFERENCES

1. SP 385.1325800. 2018. Zashchita zdaniy i sooruzhenij ot progressiruyushchego obrusheniya. Pravila proektirovaniya. Osnovnye polozheniya [Protection of buildings and structures from progressive collapse. Design rules. The main provisions.]. M.: Standartinform, 2018. S. 19 (rus)
2. UFC 4-023-03. Unified Facilities Criteria (UFC). Design of Buildings to Resist Progressive Collapse Text. Department of Defense USA, 2010. 176 p.
3. GSA. Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance, Washington, D.C., October 2016, 203 p.
4. DBN V.1.2-14-2009. Obshchiye printsipy obespecheniya nadezhnosti i konstruktivnoy bezopasnosti zdaniy, sooruzheniy stroitel'nykh konstruksiy i osnovaniy [General principles of ensuring the reliability and structural safety of buildings, structures of structures and foundations]. Kiev: Minregionstroy Ukrainy, 2009. 43 p. (ukr)
5. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I., Vorob'yev Ye.D., Rimshin V.I., Osovskikh Ye.V., Dotsenko V.N., Tvorogova M.N. O raschete sborno-monolitnykh zhelezobetonnykh karkasov zdaniy [On the calculation of precastmonolithic reinforced concrete building skeletons]. *Beton i zhelezobeton v Ukraine*. 2004. No 1(19). Pp: 2-7. (rus)
6. Dem'yanov A.I. Al'kadi S.A. Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya statiko-dinamicheskogo deformirovaniya prostranstvennoj zhelezobetonnoj ramy so slozhnonapryazhennymi rigelyami sploshnogo i sostavnogo secheniya [Experimental and theoretical studies of static-dynamic deformation of a spatial reinforced concrete frame with complexly stressed beams of solid and composite cross-section] // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018. № 6. Pp. 68–75.
7. Derkach V.N. Sovmestnaya rabota kamennogo zapolneniya i zhelezobetonного monolitного karkasa [Joint work of stone filling and ferro-concrete monolithic carcass]. *Magazine of civil engineering*. 2013. No 5(40). Pp: 20–27. (rus)

8. Yemel'yanov S.G., Klyuyeva N.V., Koren'kov P.A. Metodika opredeleniya parametrov zhivuchesti zhelezobetonnykh karkasov mnogoetazhnykh zdaniy. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy [Method for determining the survivability parameters of reinforced concrete skeletons of multi-storey buildings] *Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*. 2016. No 3 (363). Pp: 252-258. (rus)
9. Klyueva N.V., Androsova N.B. ZHivuchest' zhelezobetonnykh ram s odnostoronnimi svyazyami [Survivability of reinforced concrete frames with one-sided ties] // *Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i transport*. 2007. №. 2-14. Pp. 50-55 (rus)
10. Rastorguev B.S., Plotnikov A.I. Raschet nesushchih konstrukcij monolitnyh zhelezobetonnyh zdaniy na progressiruyushchee razrushenie s uchetom dinamicheskikh effektiv [Calculation of load-bearing structures of monolithic reinforced concrete buildings for progressive destruction, taking into account dynamic effects] // *Sb. nauch. tr. Instituta stroitel'stva i arhitektury MGSU*. M., 2008. Pp. 65–72 (rus)
11. Fedorova N.V., Koren'kov P.A. Statiko-dinamicheskoe deformirovanie monolitnyh zhelezobetonnykh karkasov zdaniy v predel'nyh i zapredel'nyh sostoyaniyah [Static-dynamic deformation of monolithic reinforced concrete frames of buildings in limiting and transcendental states] // *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2016. №. 6. Pp. 90-100 (rus)
12. Fedorova N.V., Fan D.K., Nguen T.CH. Eksperimental'nye issledovaniya zhivuchesti zhelezobetonnykh ram s rigelyami, usilennymi kosvennym armirovaniem [Experimental studies of the survivability of reinforced concrete frames with crossbars reinforced with indirect reinforcement] // *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2020. №. 1. C. 92-100 (rus)
13. Trekin N.N., Kodysh E.N., Kelasiev N.G., Shmakov S.D., Chaganov A.B., Terehov I.A. The improvement of protection methods from the progressive collapse of one-storey industrial buildings // *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2019. T. 1425. №. 1. C. 012050
14. K. D. Alogla, L. Weekes, L. Augusthus Nelson. Theoretical assessment of progressive collapse capacity of reinforced concrete structures // *Mag. Concr. Res*. 2017. № 69(3) C. 145–162.
15. Helmy H., Salem H., Mourad S. Progressive collapse assessment of framed reinforced concrete structures according to UFC guidelines for alternative path method // *Engineering Structures*. 2012. T. 42. P. 127-141.
16. F. Mohajeri Nav, U. Nima, R. Abbasnia. Analytical investigation of reinforced concrete frames under middle column removal scenario // *Adv. Struct. Eng*. 2018. № 21.9. C. 1388–1401.
17. Pham A. T., Tan K. H. Experimental study on dynamic responses of reinforced concrete frames under sudden column removal applying concentrated loading // *Engineering Structures*. 2017. T. 139. Pp. 31-45.
18. Rahai A. et al. Progressive collapse assessment of RC structures under instantaneous and gradual removal of columns // *Advances in Structural Engineering*. 2013. T. 16. №. 10. P. 1671-1682.
19. Tsai M. H., Zhuang W. B. An Analytical Approach for the Flexural Robustness of Seismically Designed RC Building Frames Against Progressive Collapse // *International Journal of Civil Engineering*. 2020. T. 18. P. 1025-1037.
20. Yang T., Chen W., Han Z. Experimental investigation of progressive collapse of prestressed concrete frames after the loss of middle column // *Advances in Civil Engineering*. 2020. T. 2020.
21. Fedorova N.V., Khalina T.A. Issledovanie dinamicheskikh dogruzhenij v zhelezobetonnykh konstruktivnykh sistemah pri vnezapnykh strukturnykh perestrojkah [Investigation of dynamic loadings RS structural systems with sudden structural reorganizations] // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2017. №5. S. 32-36
22. Patent 2642542 Rossijskoj Federacii. Ustrojstvo dlya eksperimental'nogo opredeleniya dinamicheskikh dogruzhenij v ramno-sterzhnevyykh konstruktivnykh sistemah [A device for experimental determination of dynamic additions in frame-rod structural systems] / N. V. Klyueva, P. A. Koren'kov; zayavitel' i patentoobladatel' KFU; опубл. 29.01.2018 (rus)
23. Fedorova N.V., Fan D.K., Nguen T.CH. Eksperimental'nye issledovaniya zhivuchesti zhelezobetonnykh ram s rigelyami, usilennymi kosvennym armirovaniem [Method of physical models of reinforced concrete resistance] // *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2013. №. 12. Pp. 51-55 (rus)
24. Fedorova N. V., Ngoc V. T. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions // *Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing*, 2019. T. 1425. №. 1. C. 012033

Информация об авторах:

Ильющенко Татьяна Александровна

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,
аспирант кафедры уникальных зданий и сооружений.

E-mail: tatkhalina93@yandex.ru

Колчунов Виталий Иванович

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,
Академик РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой уникальных зданий и сооружений,

ФГБОУ ВО " Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,

профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: asiorel@mail.ru

Федоров Сергей Сергеевич

ФГБОУ ВО " Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве.

E-mail: FedorovSS@mgsu.ru

Information about authors:

Ilyushchenko Tatiana A.

Southwest State University, Kursk, Russia,
postgraduate student of unique buildings and structures.

E-mail: tatkhalina93@yandex.ru

Kolchunov Vitaliy Iv.

South-West State University, Kursk, Russia,
Academician of RAACS, Doctor of Engineering, professor, head of the department of unique building and structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
professor of the department of reinforced concrete and stone structures.

E-mail: asiorel@mail.ru

Fedorov Sergey S.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
candidate in technical sciences, Department of Information Systems, Technology and Automation in Construction.

E-mail: FedorovSS@mgsu.ru

Д.Г. УТКИН¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия

ПРОЧНОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ЗОННЫМ АРМИРОВАНИЕМ ИЗ СТАЛЬНОЙ ФИБРЫ

Аннотация. На основании теоретических и экспериментальных исследований сформулированы предпосылки и метод расчета, изгибаемых и сжато-изогнутых железобетонных конструкций с зонным армированием из стальной фибры, работающих при статических и кратковременных динамических нагрузках. В разработанном методе расчета прочности нормальных и наклонных сечений реализована нелинейная деформационная модель, в основу которой положены фактические диаграммы деформирования материалов. Для подтверждения основных результатов разработана методика, запланированы и проведены численные и натурные экспериментальные исследования железобетонных балочных конструкций, армированных обычной арматурой и зонным сталефибровым слоем. Экспериментальные исследования проведены при статическом и кратковременном динамическом нагружении. В результате проведенных экспериментов получены данные, характеризующие процесс разрушения, деформирования и трещинообразования сталефиброжелезобетонных элементов при таких видах нагружения. Выявлена эффективность фибрового армирования нормальных и наклонных сечений для повышения прочностных и деформативных характеристик железобетонных конструкций.

Ключевые слова: фибробетон, статика, динамика, прочность, деформативность, нелинейность, образование трещин, эксперимент.

D.G. UTKIN¹¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

STRENGTH OF BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WITH ZONE REINFORCEMENT MADE OF STEEL FIBER

Abstract. On the basis of theoretical and experimental studies, the assumptions and calculation method for flexible and compressed-curved reinforced concrete structures with zone reinforcement made of steel fiber operating under static and short-term dynamic loads are formulated. In the developed method for calculating the strength of normal and inclined sections, a nonlinear deformation model is implemented, which is based on the actual deformation diagrams of materials. To confirm the main results of this method, numerical and full-scale experimental studies of reinforced concrete beam structures reinforced with conventional reinforcement and a zone steel-fiber layer were planned and carried out. Experimental studies were carried out under static and short-term dynamic loads. As a result of the conducted experiments, data were obtained that characterize the process of destruction, deformation and crack formation of steel-reinforced concrete elements under such types of loading. The efficiency of fiber reinforcement of normal and inclined sections for increasing the strength and deformation characteristics of reinforced concrete structures is revealed.

Keywords: fiber concrete, statics, dynamics, strength, deformability, non-linearity, crack formation, experiment.

Введение

Современное развитие строительной отрасли позволяет использовать при проектировании зданий и сооружений различные композитные и фибробетонные материалы. Эффективность применения таких материалов при проектировании и, особенно, при

усиление несущих строительных конструкций доказана многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями Российских и зарубежных ученых [4...10]. Применение зонного армирования из стальной фибры в сжатой либо растянутой зоне сечения изгибаемых и сжато-изогнутых железобетонных конструкций, и их элементов позволяет увеличивать прочность нормальных и наклонных сечений, трещиностойкость, деформативность этих конструкций при статическом и кратковременном динамическом нагружениях.

В настоящее время при проектировании несущих конструкций зданий и сооружений необходимо все чаще учитывать возможное динамическое воздействие на здание или сооружение. Такое воздействие зачастую приводит к развитию больших деформаций в строительных конструкциях, потери несущей способности и разрушению. Таким образом, для железобетонных конструкций зданий и сооружений, работающих в условиях возможного динамического воздействия, необходимо применять материалы, обладающие повышенной несущей способностью и энергоемкостью, способных не разрушаясь выдержать такое воздействие.

Однако при всем преимуществе сталефибробетона, до сих пор возникает множество трудностей в его массовом применении. Это вызвано как сложностью технологии изготовления сталефибробетонных конструкций и фибробетонной смеси на строительной площадке, так и отсутствием метода и доступного инструмента расчета различных вариантов применения сталефибробетонных конструкций для зданий. Существующий нормативный документ СП 360.1325800.2017. «Конструкции сталефибробетонные» не позволяет в полной мере оценить несущую способность конструкций, работающих в условиях кратковременного динамического нагружения. Также в существующих нормах не подразумевается расчет прочности нормальных и наклонных сечений железобетонных элементов с применением зонного армирования элемента или конструкции, что актуально при выполнении усиления существующей поврежденной при эксплуатации железобетонной конструкции.

Таким образом, задачи исследования работы изгибаемых и сжато-изогнутых железобетонных конструкций с зонным армированием из стальной фибры при статическом и кратковременном динамическом нагружении, а также разработки универсального метода и реализующего его инструмента, являются весьма актуальными для расширения областей применения сталефибробетона как материала для усиления существующих, так и для проектирования новых экономичных и надежных железобетонных конструкций зданий и сооружений.

Для оценки несущей способности сталефиброжелезобетонных конструкций разработан метод расчета прочности изгибаемых и сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при статическом и кратковременном динамическом нагружениях, позволяющий наглядно оценить запас несущей способности, либо обнаружить перегрузку конструкции или ее элемента под нагрузкой.

Физической основой предлагаемого метода расчета сталефиброжелезобетонных элементов при статическом и кратковременном динамическом нагружении являются действительные нелинейные диаграммы деформирования бетона, фибробетона и арматуры, аналитическое описание которых получено на основе обобщения имеющихся экспериментальных данных. Основные параметрические точки на диаграммах при кратковременном динамическом нагружении трансформируются вдоль временной координаты. Аналитическое описание коэффициентов динамического упрочнения для бетона и арматуры получены на основе логарифмических зависимостей профессоров Ю.М. Баженова и Г.И. Попова. Нелинейная диаграмма деформирования и коэффициенты динамического упрочнения для сталефибробетона (см. рисунок 1) предложены с учетом работ В.И. Григорьева [4], Л.Г. Курбатова, Ф.Н. Рабиновича [5] и результатов собственных исследований [6, 7].

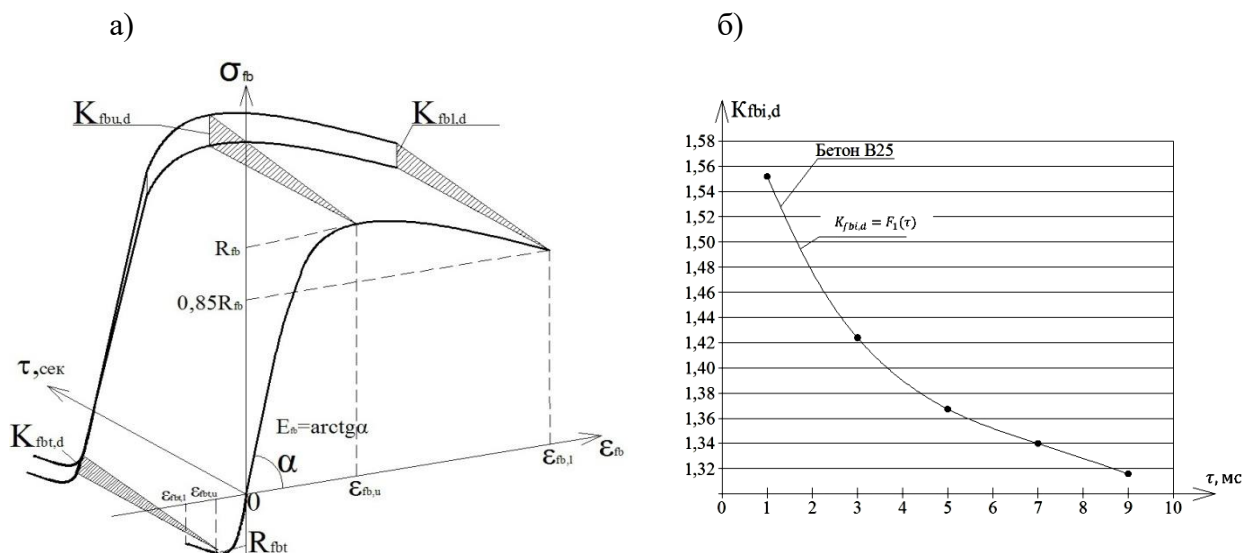


Рисунок 1 – Физические характеристики сталефибробетона при статическом и кратковременном динамическом нагружении: а) диаграмма « σ - ε » при сжатии и растяжении, б) зависимость коэффициента динамического упрочнения сталефибробетона от времени действия кратковременной динамической нагрузки

Разработанный метод расчета прочности и трещиностойкости сталефиброжелезобетонных элементов реализует деформационную модель с учетом нелинейных диаграмм деформирования бетона, арматуры и сталефибробетона, исходя из их напряженно-деформированного состояния на различных стадиях работы элемента (см. рисунок 2). За критерий исчерпания статической либо динамической прочности нормального сечения принимается достижение деформациями растянутой арматуры и сжатого бетона (сталефибробетона) в рассматриваемом сечении элемента их предельных значений.

Процесс вычисления внутренних усилий в сталефибробетонном элементе разбивается на заданное количество этапов, на каждом из которых определяются значения высоты сжатой зоны бетона (фибробетона), деформаций бетона (сталефибробетона) сжатой зоны сечения, сталефибробетона растянутой зоны сечения, сжатой и растянутой арматуры.

Далее, на основании аналитических зависимостей, описывающих диаграммы деформирования бетона, арматуры и сталефибробетона, производится определение напряжений в каждом из этих материалов по вычисленным значениям деформаций. По полученным значениям напряжений осуществляется послойное суммирование усредненных в пределах слоев значений внутренних усилий. В результате определяются предельные относительные продольные усилия и изгибающие моменты, воспринимаемые нормальным сечением, относительно центра тяжести бетонного сечения, которые являются координатами, описывающими область относительного сопротивления по трещиностойкости и прочности нормального сечения сталефиброжелезобетонного элемента при статическом или кратковременном динамическом нагружении. При этом за единичные параметры приняты несущая способность бетонного сечения при сжатии и сжатии с изгибом относительно его центра тяжести. Получаемые при расчетах области относительного сопротивления позволяют оценить прочность и трещиностойкость сталефиброжелезобетонного элемента при любом сочетании продольных сил и изгибающих моментов.

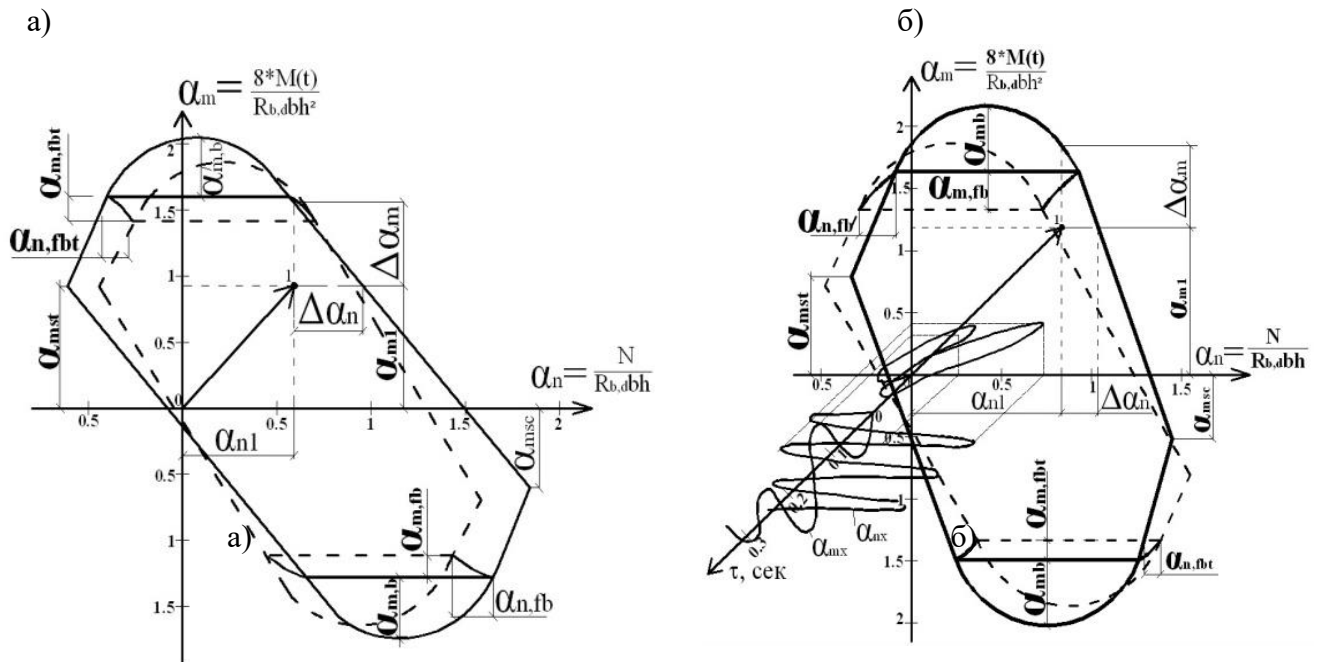


Рисунок 3 - Область относительного сопротивления по прочности нормального сечения при кратковременном динамическом нагружении сжато-изогнутого железобетонного элемента с зонным армированием из стальной фибры: а) - в растянутой зоне; б) - в сжатой зоне.

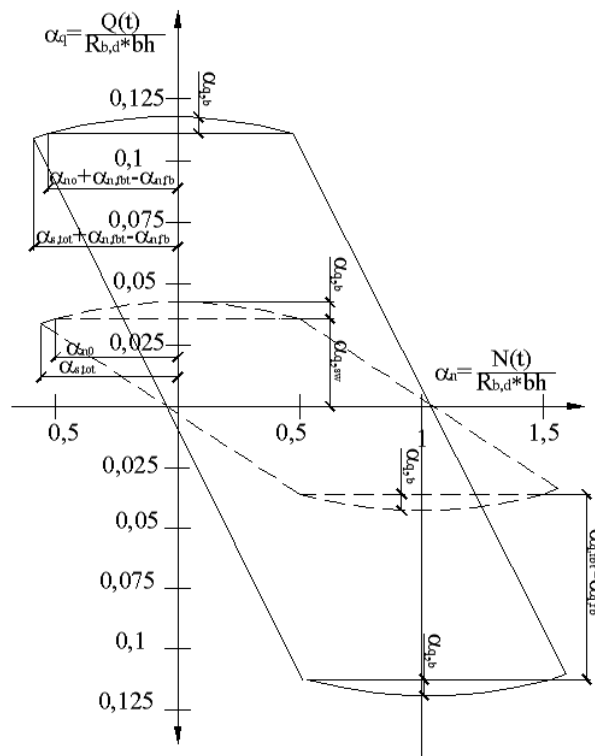


Рисунок 4 - Область относительного сопротивления по прочности наклонного сечения при кратковременном динамическом нагружении сжато-изогнутого железобетонного элемента с зонным армированием из стальной фибры

Разработанные методы расчета доведены до программы расчета железобетонных конструкций с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении с учетом неупругих свойств сталефибробетона и железобетона. Выполненные численные исследования позволили установить влияние различных параметров сталефибрового армирования (коэффициент фибрового армирования, виды

применяемых фибр, длина и размеры поперечного сечения стальных фибр, класс бетона) на прочность нормальных и наклонных сечений изгибаемых и сжато-изогнутых железобетонных элементов при статическом и кратковременном динамическом нагружении.

Для верификации разработанного метода расчета, а также исследования влияния величины и расположения зонного армирования из стальной фибры и комбинированного армирования на прочность нормальных и наклонных сечений, деформативность и энергоемкость железобетонных элементов были проведены экспериментальные исследования изгибаемых и сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным сталефибровым армированием при кратковременном динамическом нагружении.

С зонным армированием из стальной фибры было испытано двадцать две сталефиброжелезобетонных балок с прогнозируемым разрушением по нормальному сечению (программа эксперимента – рисунок 5) и восемь балок с прогнозируемым разрушением по наклонному сечению (см. рисунок 6).

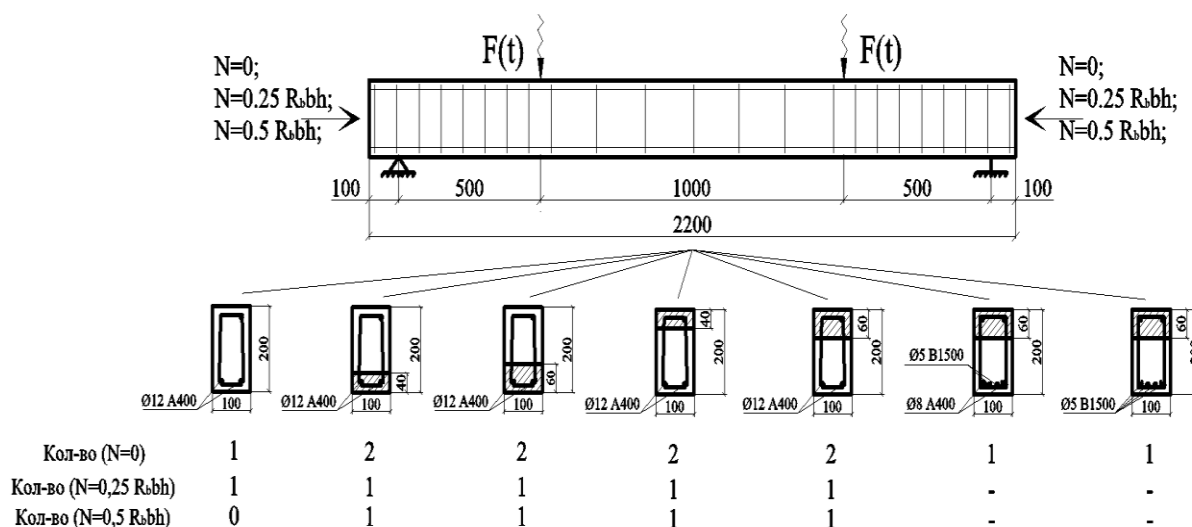
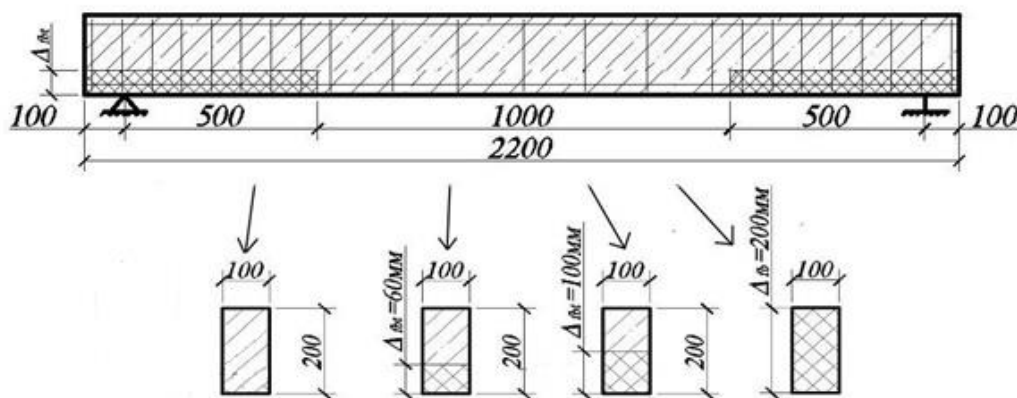


Рисунок 5 - Программа экспериментальных исследований фиброжелезобетонных балок, испытанных до разрушения по нормальному сечению



Условные обозначения:



Рисунок 6 - Программа экспериментальных исследований фиброжелезобетонных балок, испытанных до разрушения по наклонному сечению

Зонное армирование из стальной фибры, высотой 0,2 h и 0,3 h, применялось либо в растянутой, либо в сжатой зонах. Было испытано по четыре образца для каждого варианта зонного армирования, два из которых испытывалось при кратковременном динамическом поперечном изгибе, а два - при кратковременном динамическом поперечном изгибе с обжатием, с различным уровнем продольного сжимающего усилия.

Длина экспериментальных балок составляла 2200 мм, расчетный пролет – 2000 мм., поперечное сечение-100*200 мм.

Процент фибрового армирования по объему бетона составлял 2%. Применялась фибра, нарезанная из стальной полосы, сечением 0,4 х 0,6 мм длиной 40 мм. Армирование балок выполнено вязаными пространственными каркасами. В нижней зоне балок были установлены два стержня $\varnothing 12$ A400. Верхняя арматура выполнена из двух стержней $\varnothing 6$ A240, поперечная арматура - в виде гнутых хомутов из $\varnothing 5$ Bp500.

Для проведения экспериментальных исследований были разработаны оригинальная установка и стенд для испытания изгибаемых и сжато-изогнутых сталефиброжелезобетонных элементов при кратковременном динамическом нагружении.

В ходе экспериментальных исследований все конструкции были доведены до разрушения.

Полученные при экспериментальных исследованиях схемы трещинообразования и разрушения элементов показали, что железобетонные балки с зонным сталефибровым армированием в растянутой зоне разрушились вследствие образования и дальнейшего раскрытия по высоте нормальных трещин по всей длине балки с последующим разрушением сжатой зоны бетона. У элементов с зонным армированием из стальной фибры в сжатой зоне разрушение происходит вследствие образования нормальных трещин по длине балки и при дальнейшем развитии трещин в процессе загрузки происходит незначительное разрушение сжатой зоны бетона. При увеличении уровня продольной сжимающей силы наблюдается более характерное разрушение сжатой зоны бетона, а количество нормальных трещин по длине балки уменьшается. Основное разрушение происходит в центральной части элемента. Характерные схемы разрушения и трещинообразования железобетонной и сталефиброжелезобетонных балок, испытанных при кратковременном динамическом изгибе представлены на рисунке 7.

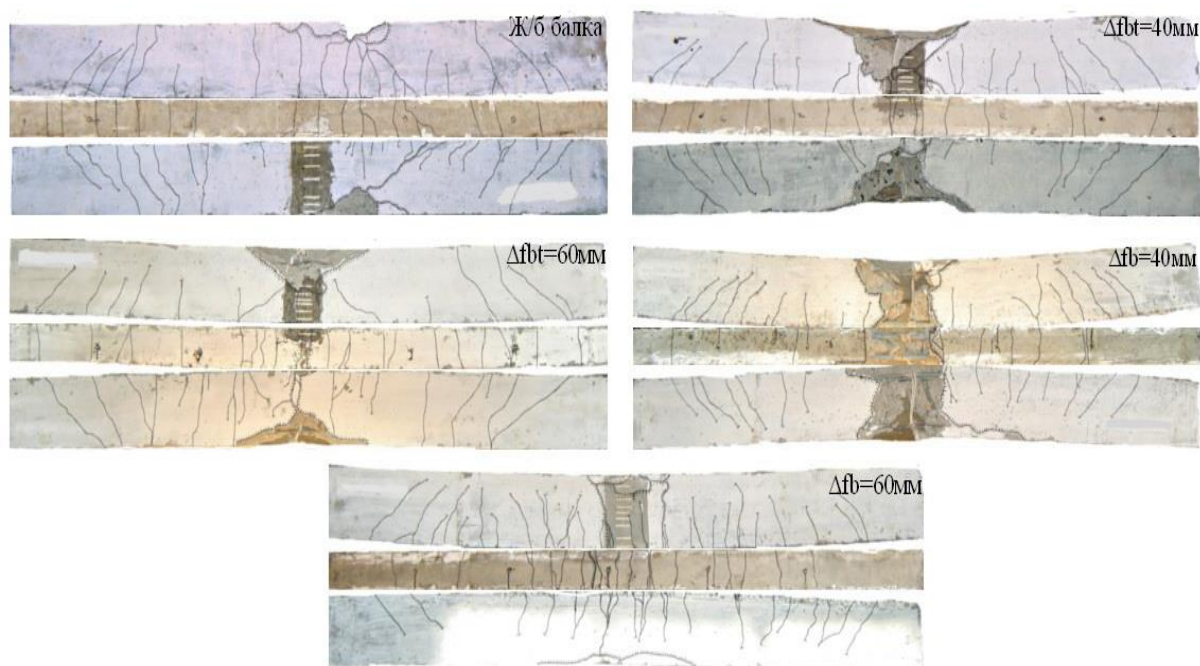


Рисунок 7 – Схемы разрушения и трещинообразования сталефиброжелезобетонных балок при кратковременном динамическом изгибе

При анализе схем разрушения и трещинообразования балок, испытанных с разрушением по наклонному сечению (см. рисунок 8), можно сказать, что железобетонные балки с зонным сталефибровым армированием разрушились по причине образования и дальнейшего раскрытия наклонной трещины в приопорных частях с дальнейшим разрушением бетона около ее вершины и появлением больших трещин в растянутой зоне средней части балки (при $\Delta f_{bt} = 0$ мм и $\Delta f_{bt} = 60$ мм). В балках с зонным армированием высотой $\Delta f_b = 100$ мм и $\Delta f_b = 200$ мм наклонные трещины практически не наблюдались.

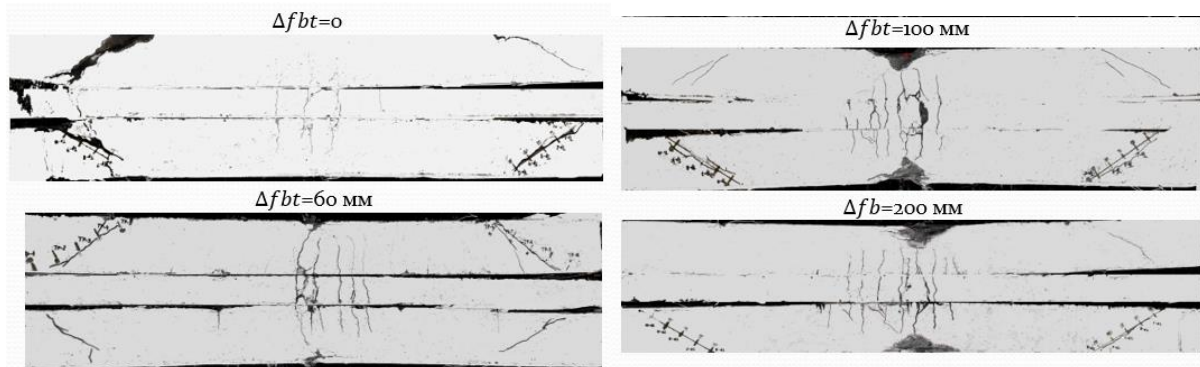


Рисунок 8 – Схемы разрушения и трещинообразования сталефиброжелезобетонных балок при кратковременном динамическом изгибе

С увеличением высоты зонного сталефибрового армирования разрушается сжатая зона бетона с меньшей интенсивностью, а количество нормальных трещин по длине балки увеличивается, основное разрушение происходит в центральной части балки. Наблюдаются сколы сжатой зоны в середине балок. Менее характерно разрушается наклонное сечение, что позволяет сказать, что увеличение зонного армирования в приопорных частях балки благоприятно сказывается на ее прочности по наклонному сечению в результате работы в условиях кратковременного динамического изгиба.

В результате проведенных экспериментов установлены зависимости деформативности бетона, сталефибробетона и арматуры, несущей способности, характера развития трещин и разрушения образцов, изменения энергоемкости и прогибов сталефиброжелезобетонных элементов от величины продольного усилия и параметров зонного сталефибрового и смешанного армирования при кратковременном динамическом нагружении.

Анализ эффективности применения зонного армирования из стальной фибры для изгибаемых и сжато-изогнутых железобетонных элементов при различном уровне продольной сжимающей силы при кратковременном динамическом нагружении показал, что использование зонного сталефибрового армирования в растянутой зоне толщиной 0,2 и 0,3 h для изгибаемых железобетонных элементов повышает их несущую способность соответственно на 12 % и 18%, энергоемкость на 6 % и 10 %, а максимальные прогибы уменьшаются на 22 % и 24 %. При расположении зонного сталефибрового армирования в сжатой зоне сечения - несущая способность повышается соответственно на 20 % и 25 %, энергоемкость на 14 % и 20 %, а максимальные прогибы уменьшаются на 38 % и 43 % (см. рисунки 9, 10).

При действии продольной сжимающей силы, равной $\alpha_n = 0,25 R_b b h$, несущая способность железобетонных и сталефиброжелезобетонных элементов повышается в среднем на 5...6 % по сравнению с изгибаемыми элементами. При последующем увеличении продольной сжимающей силы до уровня $\alpha_n = 0,5 R_b b h$ происходит снижение несущей способности сталефиброжелезобетонных элементов в среднем на 3...8 % по сравнению с чистым изгибом.

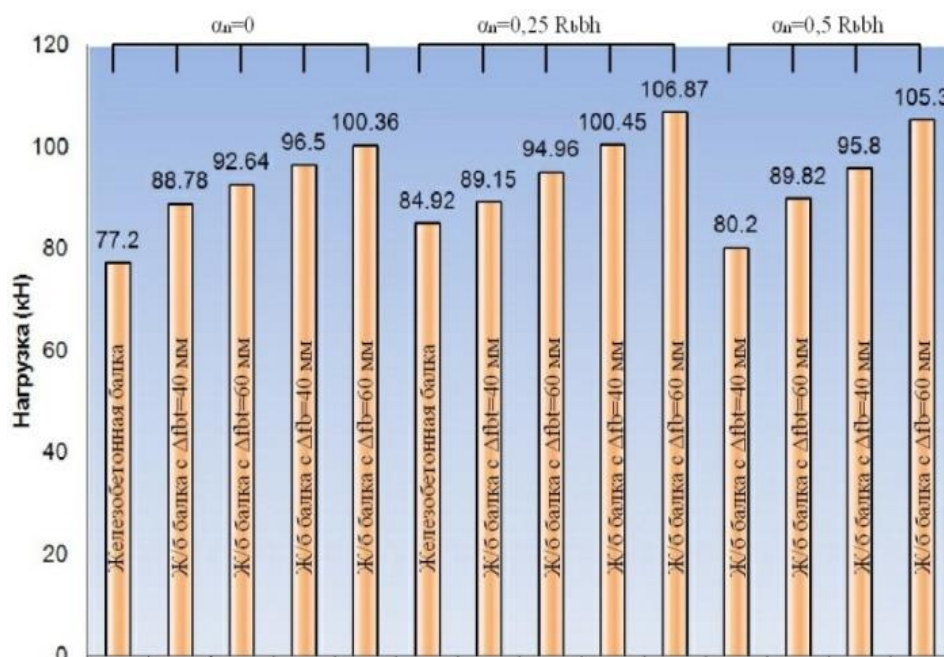


Рисунок 9 – Изменение значения разрушающей нагрузки в зависимости от уровня продольной сжимающей силы и величины зонного сталефибрового армирования

Анализ влияния увеличения по высоте зонного сталефибрового армирования в приопорных частях балки, длиной равной 500 мм, на несущую способность железобетонных элементов позволяет сделать следующие вывод, что применение зонного сталефибрового армирования для изгибаемых железобетонных элементов повышает прочность наклонного сечения по сравнению с:

- со сталефибровым армированием высотой 60 мм в 2,1 раза;
- со сталефибровым армированием высотой 100 мм в 2,4 раза;
- со сталефибровым армированием высотой 200 мм в 3 раза.

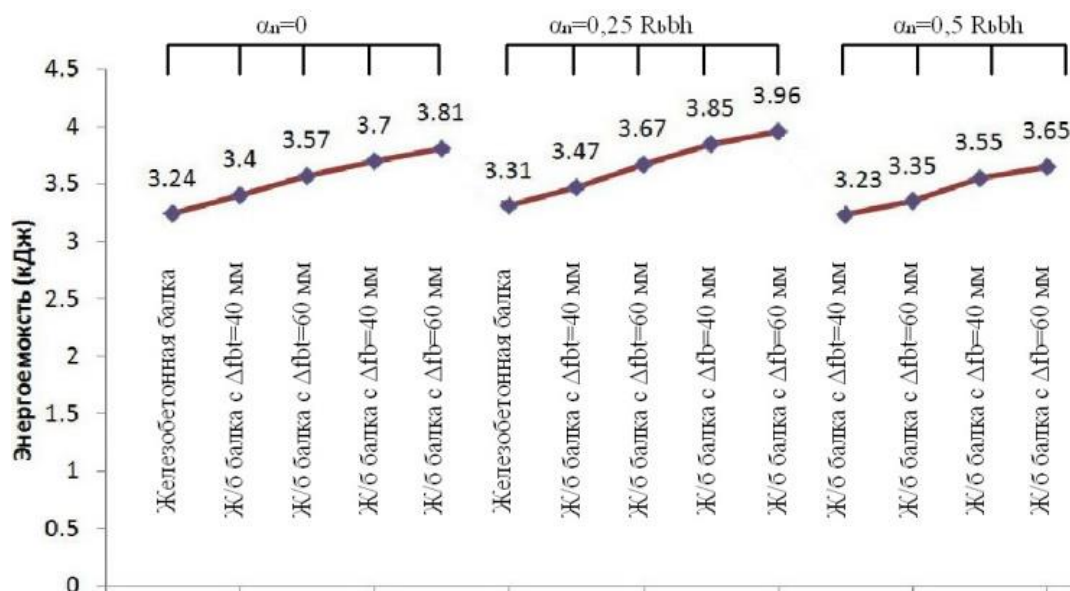


Рисунок 10 – Диаграмма изменения максимальной энергоемкости экспериментальных образцов

Установлено, что наибольший эффект на повышение несущей способности железобетонных элементов оказывает применение зонного сталефибрового армирования в сжатой зоне, при этом величина такого армирования составляет 1/3 от высоты сечения элемента.

Анализ результатов расчетов на основе разработанного метода расчета прочности нормальных сечений сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры и сравнение их с результатами экспериментальных исследований при кратковременном динамическом нагружении показывают, что отклонения составляют 4-15 % в сторону запаса прочности.

Выводы

1. В результате проведенных экспериментальных исследований прочности и деформативности изгибаемых сталефиброжелезобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры в сжатой зоне и высокопрочной арматурой в растянутой зоне сечения, получены новые опытные данные, характеризующие процесс сопротивления и перемещения таких элементов при воздействии на них кратковременной динамической нагрузки.

2. Полученные экспериментальные данные позволили определить самое эффективное с позиции увеличения несущей способности и уменьшения прогибов армирование из высокопрочной арматуры для изгибаемых сталефиброжелезобетонных конструкций.

3. Разработан метод расчета таких элементов на основе нелинейной деформационной модели с использованием действительных диаграмм деформирования материалов с помощью областей относительного сопротивления по прочности, позволяющий наглядно графически и аналитически определять на любом этапе нагружения конструкции значения расчетных усилий, коэффициенты запаса по прочности нормальных сечений или перегрузку.

4. Выявлена эффективность использования зонного армирования из стальной фибры для усиления наклонных сечений изгибаемых элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Динамический расчет железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1974. 207 с.
2. Попов Н.Н. Расторгуев Б.С. Вопросы расчета и конструирования специальных сооружений. М.: Стройиздат, 1980. 189 с.
3. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. М.: Стройиздат, 1970. 270 с.
4. Григорьев В.И. О коэффициенте динамического упрочнения сталефибробетона при растяжении // Исследование и расчет пространственных конструкций гражданских зданий.: сб. науч. тр. Л., 1985. С.95-99.
5. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. М.: Изд-во АСВ, Москва, 2004. 560 с.
6. Уткин Д. Г. Экспериментальные исследования сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2008. № 3. С. 156-164.
7. Плевков В.С., Уткин Д.Г. Прочность железобетонных элементов с армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении // Научно-технический журнал «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений». 2014. № 5. С. 38-44.
8. Морозов В.И., Хегай А.О. Исследования фиброжелезобетонных колонн с высокопрочной арматурой // Вестник гражданских инженеров. 2011. №3(28). С. 34-37.
9. Морозов В.И. Расчет изгибаемых элементов с высокопрочной арматурой с фибровым армированием растянутых зон // Промышленное и гражданское строительство. 2007. №2. С. 36-39.
10. Плевков В.С., Уткин Д.Г., Карпов А.Е. Прочность и деформативность железобетонных элементов с зонным фибровым армированием при кратковременном динамическом нагружении // Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия. Сборник докладов Международной научной конференции, посвященной 85-летию кафедры железобетонных и каменных конструкций и 100-летию со дня рождения Н.Н. Попова (19-20 апреля 2016 г., Москва). Москва, 2016. С. 342-348.

REFERENCES

1. Popov N.N., Rastorguev B.S. Dinamicheskii raschet zhelezobetonnykh konstruktov [Dynamic calculation of ferro-concrete designs]. Moscow, Stroyizdat, 1974. 207 p. (rus)
2. Popov N.N., Rastorguev B.S. Voprosy rascheta i konstruirovaniya spetsial'nykh sooruzhenii [Questions of calculation and designing of special constructions]. Moscow, Stroyizdat, 1980, 189 p. (rus)
3. Bazhenov Yu.M. Beton pri dinamicheskom nagruzhении [Concrete at dynamic load]. Moscow, Stroyizdat, 1970. 270 p. (rus)
4. Grigor'ev V.I. O koeffitsiente dinamicheskogo uprochneniya stalefibrobetona pri rastyazhenii [About factor dynamic durability of steel fibre reinforced concrete at a stretching]. Research and calculation of spatial designs of civil buildings. The collection of proceedings. Leningrad, 1985. Pp.95-99. (rus)
5. Rabinovich F.N. Kompozity na osnove dispersno armirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologiya, konstruktii [Composites on a basis steel fibre reinforced concrete. Questions of the theory and designing, technology, designs]. Moscow: Izdatel'stvo ASV, 2004. 560 p. (rus)
6. Utkin D.G. Eksperimental'nye issledovaniya szhato-izognutykh zhelezobetonnykh elementov s zonnym armirovaniem iz stal'noi fibry pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Experimental researches it is compressed - bent ferro-concrete elements with zoned reinforcing from a steel fiber at short-term dynamic load]. The bulletin of Tomsk state architectural - building university. 2008. No. 3. Pp. 156-164. (rus)
7. Plevkov V.S., Utkin D.G. Prochnost' zhelezobetonnykh elementov s armirovaniem iz stal'noj fibry pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении // Nauchno-tehnicheskij zhurnal «Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij». 2014. № 5. S. 38-44.
8. Morozov V.I., Hegaj A.O. Issledovaniya fibrozhelezobetonnykh kolonn s vysokoprochnoj armaturoj [The reseafch of steel fibre reinforced concrete columns with high-strength reinforced bars] // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. 2011. No.3(28). Pp. 34-37. (rus)
9. Morozov V.I. Raschet izgibaemyh jelementov s vysokoprochnoj armaturoj s fibrovym armirovaniem rastjanutykh zon [The calculation of bent elements with high-strength reinforced bars with fibre reinforcing the stretched zones] // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2007. No.2. Pp. 36-39. (rus).
10. Plevkov V.S., Utkin D.G., Karpov A.E. Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh ehlementov s zonnym fibrovym armirovaniem pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [The strength and deformability of reinforced concrete elements with fiber reinforcement. in short-term dynamic loading] // Sovremennye problemy rascheta zhelezobetonnykh konstrukcij, zdaniy i sooruzhenij na avarijnye vozdejstviya. Sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, posvyashchennoj 85-letiyu kafedry zhelezobetonnykh i kamennykh konstrukcij i 100-letiyu so dnya rozhdeniya N.N. Popova (19-20 aprelya 2016 g., Moskva). Moskva, 2016. Pp. 342-348 (rus).

Информация об авторе:

Уткин Дмитрий Геннадьевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: udg70@mail.ru

Information about the author:

Utkin Dmitry G.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
candidate in technical sciences, docent, associate professor of the department of reinforced concrete and stone structures.
E-mail: udg70@mail.ru

В.З. АБДРАХИМОВ¹, Е.С. АБДРАХИМОВА²

¹Самарский государственный экономический университет, г. Самара, Россия

² Самарский университет (Национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева), г. Самара, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЖАРОСТОЙКИХ БЕТОНОВ АЛЮМОСОДЕРЖАЩЕГО НАНОТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ И ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ

Аннотация. В настоящей работе с применением отходов химической промышленности – алюмосодержащего нанотехногенного сырья и топливно-энергетического комплекса – углеобогащения на основе фосфатных связующих получен жаростойкий бетон с высокими физико-механическими показателями. Благодаря использованию ортофосфорной кислоты в качестве связующего удается утилизировать 80-90% отходов химической промышленности и углеобогащения, что способствует снижению антропогенной нагрузки на окружающую среду и человека. Исследования показывают, что при уменьшении размера зерен увеличивается общая величина поверхности раздела фаз, уменьшается средний радиус кривизны выпуклых участков, растет их избыточная поверхностная энергия, уменьшаются расстояния между источниками и поглотителями вакансий в системе. Экспериментальные исследования и богатый практический опыт керамических производств подтверждают важнейшую роль степени измельчения (или использования наноразмерных сырьевых материалов). За счет действия одного этого фактора удастся в ряде случаев снизить требуемую температуру спекания на 50-100°C и более. Использование отходов производств в производстве строительных материалов способствует: а) утилизации промышленных отходов; б) охране окружающей среды; в) расширению сырьевой базы для получения жаростойких бетонов на основе фосфатных связующих.

Ключевые слова: отходы углеобогащения, экология, жаростойкий бетон, отработанный катализатор, ортофосфорная кислота.

B.Z. ABDRAKHIMOV¹, E.S. ABDRAKHIMOVA²,

¹Samara State University of Economics, Samara, Russia,

²Samara University (National Research University named after Academician S.P. Koroleva), Samara, Russia

USE OF ALUMINUM-CONTAINING NANOTECHNOGENIC RAW MATERIALS AND CARBON WASTE IN THE PRODUCTION OF HEAT-RESISTANT CONCRETE

Abstract. In this work, using waste from the chemical industry — aluminum-containing nanotechnogenic raw materials and a fuel and energy complex — coal enrichment based on phosphate binders, heat-resistant concrete with high physical and mechanical properties is obtained. Thanks to the use of orthophosphoric acid as a binder, it was possible to utilize 80-90% of chemical industry waste and coal preparation, which helps to reduce the anthropogenic load on the environment and humans. Studies show that as the grain size decreases, the total size of the interface is increased, the average radius of curvature of the convex sections decreases, their excess surface energy grows, and the distances between the sources and absorbers of vacancies in the system decrease. Experimental studies and rich practical experience in ceramic industries confirm the crucial role of the degree of grinding (or the use of nanoscale raw materials). Due to the action of this factor alone, it is possible in some

cases to reduce the required sintering temperature by 50-100 °C or more. The use of industrial wastes in the production of building materials contributes to: a) the utilization of industrial wastes; b) environmental protection; b) the expansion of the raw material base for heat-resistant concrete based on phosphate binders.

Keywords: coal preparation waste, ecology, heat-resistant concrete, spent catalyst, phosphoric acid.

Введение

В современных экономических условиях при ограниченном государственном финансировании геологоразведочных работ весьма важным является принятие оптимальных управленческих решений по выбору сырьевых материалов, которые дадут максимальный не только экономический, но и экологический эффект [1, 2]

Альтернативным сырьевым источником являются **техногенные вторичные ресурсы** (отходы промышленности) [3], но пока они используются недостаточно. Но по мере истощения природных ресурсов, повышения требований к охране окружающей среды и разработки новых эффективных технологий техногенное сырье будет применяться значительно шире.

Производство строительных материалов характеризуется большим потреблением энергетических ресурсов, затратами на производство и высоким уровнем материалоемкости [4].

Материалоемкость производства строительных материалов определяется количеством сырья, израсходованного на их производство, к общему объему выпущенной продукции. Одним из направлений снижения материалоемкости является применение производственных отходов в качестве выгорающих добавок и в качестве алюмосодержащего сырья для производства новых строительных изделий и жаростойких бетонов [5].

Один из четырех законов Барри Коммонера (1917-2012) гласит: «Природа знает лучше». Процессы самоочищения происходят и без участия человека, но для их ускорения необходимы дополнительные условия [6, 7]. К дополнительным условиям можно отнести и европейское законодательство (Директива Европейского Парламента и Совета Европейского Союза 2008/98/ЕС), которое подчеркивает, что существует приоритетность методов управления отходами, в котором наиболее приемлемым вариантом утилизации отходов с сопутствующим повышением энергоэффективности композитного производства является их переработка с целью повторного использования полученных при этом продуктов [8]. Опыт передовых зарубежных стран показал техническую осуществимость этого направления и применения еще и как инструмента защиты природной среды от загрязнения [9]. Вместе с тем из отходов или из отходов в комбинации с природным сырьем могут быть изготовлены практически все основные строительные материалы.

Цель работы: а) основной целью данной работы являлось установление возможности использования крупнотоннажных минеральных отходов в качестве наполнителя для получения жаростойкого бетона, отвечающего современным требованиям безопасности и обладающего необходимыми конкурентными преимуществами. б) снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду и человека за счет использования крупнотоннажных отходов химического промышленности и топливно-энергетического комплекса в производстве жаростойких бетонов на основе фосфатных связующих.

Жаростойкие бетоны

Современное развитие экономики России выдвигает ряд научно-технических задач, решение которых предполагает радикальное снижение материалоемкости конструкций, энергетических и тепловых потерь, а также рациональное и эффективное использование всех видов ресурсов [10-13]. Такая тенденция наблюдается не только в России, но и за рубежом, поэтому вопросы разработки новых жаростойких материалов с использованием отходов

производств имеют первостепенное значение. Наибольший эффект при решении подобных задач достигается при замене штучных огнеупорных изделий огнеупорными легкими жаростойкими бетонами. Как известно, практически на каждом предприятии эксплуатируется большое число теплоагрегатов и котельных установок [10-13].

Как показали исследования [10-13], наибольшая долговечность из жаростойких бетонов (композитов), может быть достигнута за счет применения химических связующих, которые позволяют использовать в композитах до 90% отходов.

Фосфатные связующие, применяемые в жаростойких бетонах относятся к химическим связующим.

Химические связующие дают возможность широко использовать многие неорганические отходы промышленности, в том числе нанотехногенное сырье — высокоглиноземистые отходы нефтехимии. При формировании прочного камня в бетоне происходит силикатное или фосфатное связывание неорганических отходов в устойчивые высокотемпературные соединения. Пропитка огнеупорных заполнителей химическими связующими упрочняет их, а в некоторых случаях и повышает огнеупорность, что очень важно для жаростойких бетонов.

В настоящее время в России и за рубежом проведено большое количество работ, направленных на совершенствование технологии получения фосфатного жаростойкого бетона, повышение его эксплуатационных свойств, а также расширение сырьевой базы.

Сырьевые материалы

Для получения жаростойкого бетона в качестве связующего использовалась фосфатная кислота, в качестве алюмосодержащего компонента — отработанный катализатор ИМ-2201, в качестве наполнителя — отходы углеобогащения ЦОФ «Абашевской», химические составы которых представлены: оксидного в таблице 1, а поэлементного в таблице 2.

Таблица 1 – Химический оксидный состав сырьевых материалов

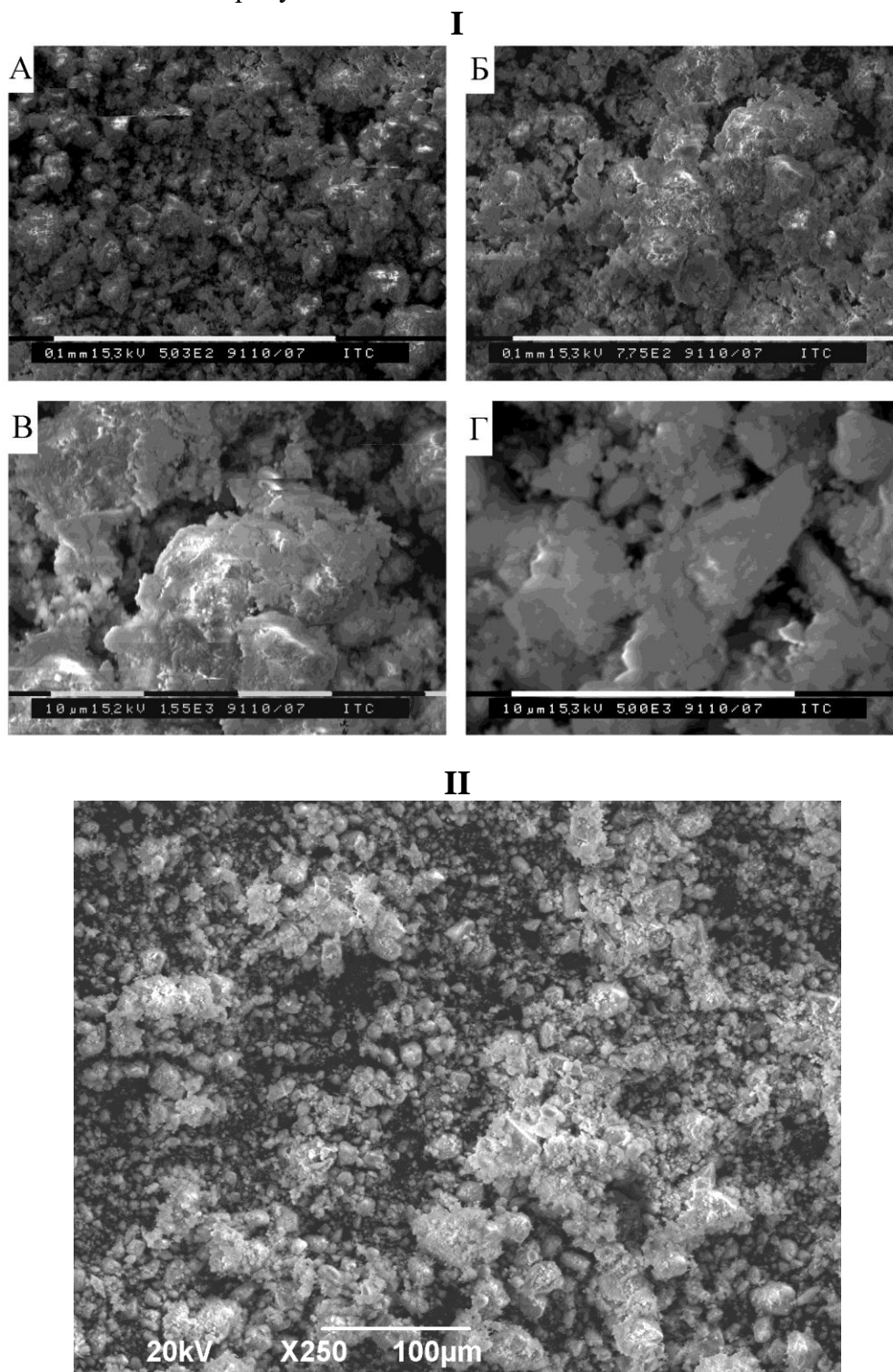
Компонент	Содержание оксидов, мас. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	R ₂ O	П.п.п.
1. Отработанный катализатор	7,90	74,5	0,15	—	0,10	14,8	1,58	—
2. Отходы углеобогащения ЦОФ «Абашевской»	54-55	16-17	3-4	5-6	1,5-2	—	3-4	15-17

Таблица 2 - Элементный химический состав сырьевых материалов

Отход	Содержание элементов, мас. %									
	C	O	Na	Mg	Al+Ti	Si	Cr	K	Ca	Fe
1. Катализатор ИМ-2201	—	60,74	1,0	—	26,58	2,82	8,1	1,80	—	0,01
2. Отходы углеобогащения ЦОФ «Абашевской»	6,2	52,92	1,54	0,2	11,58	19,5		1,71	3,5	2,85

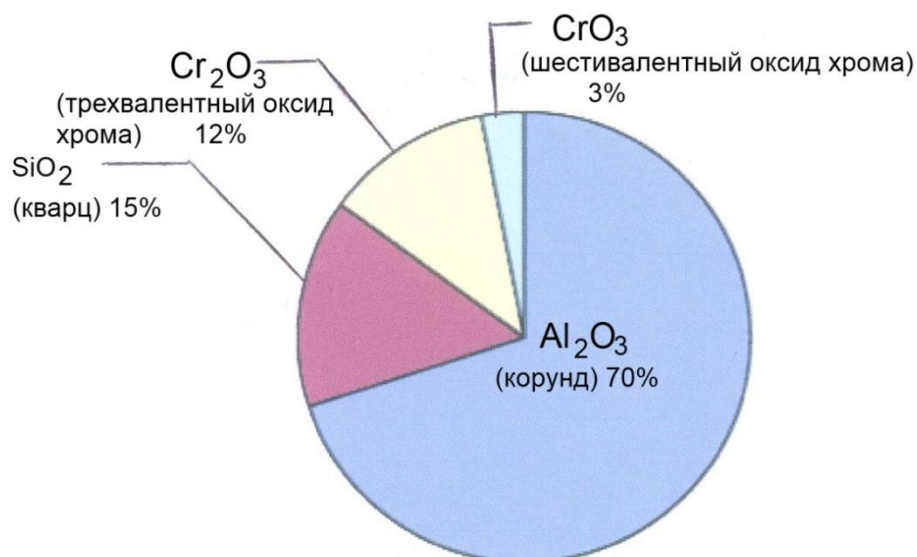
Отработанный катализатор ИМ–2201. В Самарской области, где развито химическое производство (г. Новокуйбышевск — химкомбинат и г. Тольятти — завод синтетического каучука), имеются большие количества высокоглиноземистых отходов. В процессе синтеза бутадиен-стирольных каучуков образуется отработанный катализатор ИМ–2201. Отработанный катализатор ИМ–2201, представляет собой тонкодисперсный порошок с удельной поверхностью до 8000 см²/г и огнеупорностью до 2000°С.

Микроструктура отработанного катализатора ИМ-2201 выполнена с помощью растрового электронного микроскопа JEOL-6390A и представлена на рисунке 1, а минералогический состав на рисунке 2.



*Рисунок 1 - Микроструктура сырьевых материалов: I — отработанного катализатора ИМ-2201. Увеличение: А – x50, Б – x750, В – x1500, Г – x5000
II — отходов углеобогащения ЦОФ «Абашевской». Увеличение x250*

а)



б)

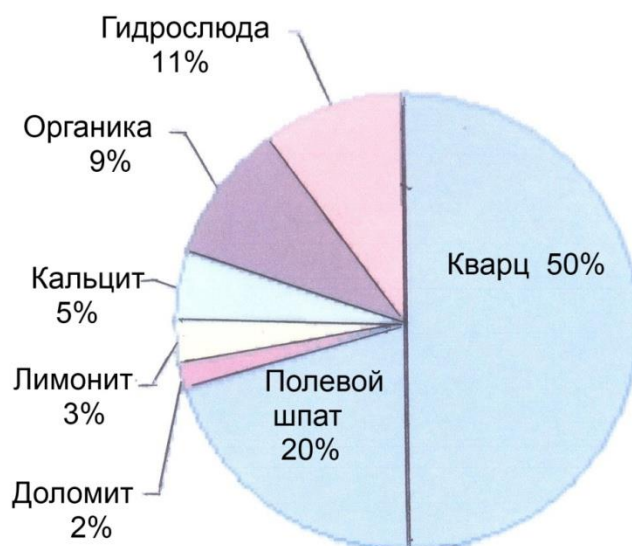


Рисунок 2 – Минералогический состав сырьевых материалов:
а) отработанный катализатор ИМ-2201; б) отходы углеобогащения ЦОФ «Абашевской»

Как видно из рисунка 2, в минералогическом составе отработанного катализатора 70% содержится Al_2O_3 . В составе неметаллических материалов Al_2O_3 обычно присутствует в качестве высокотемпературной α — модификации, которая является аналогом природного минерала — корунда [13]. Температура плавления корунда 2050°C , превращение низкотемпературной γ - в α -модификацию происходит при температурах свыше 1000°C .

Отработанный катализатор отличается от высокодисперсных порошкообразных материалов природного и техногенного происхождения наноразмерностью, которая находится в пределах от 80 до 3000 нм и зависит от условий образования.

Исследования образцов отработанного катализатора с целью определения размерности его частиц были приведены в институте ядерных исследований (г. Гатчина, Ленинградская область) методом малоуглового рассеяния нейтронов на дифрактометре «Мембрана-2» [14].

Отходы углеобогащения Абашевской ЦОФ (г. Новокузнецк). Отходы обогащения представлены в основном сланцами аргиллито-алевролитового состава с прослойками песчаников.

Открытое акционерное общество "Центральная обогатительная фабрика "Абашевская" осуществляет следующие виды деятельности:

- а) добыча каменного угля, бурого угля и торфа;
- б) добыча, обогащение и агломерация каменного угля;

Основной деятельностью акционерного общества является обогащение каменного угля.

Растущие потребности народного хозяйства в топливно-энергетическом сырье выдвигают на первый план задачу его комплексного использования и широкого вовлечения в хозяйственный оборот образующихся отходов — вторичных ресурсов.

Отходы углеобогащения относятся к топливно-электроэнергетическому комплексу, который является одним из основных «загрязнителей» окружающей природной среды. Это выбросы в атмосферу (48% всех выбросов в атмосферу), сбросы сточных вод (36% всех сбросов), а также образование твердых отходов (30% всех твердых загрязнителей). Исследования показали, что в исследуемых отходах углеобогащения повышенное содержание органики (п.п.п.=15-17%, таблица 1) и углерода ($C=6,2\%$, таблица 2), которые могут образовывать глобальные потоки УВ (углеводородов).

В работе [15] было показано, что глобальные потоки УВ (углеводородов) в отходах топливно-энергетического комплекса проникают в почву. В результате в почвах складывается определенный комплекс УВ всевозможных классов, находящихся в разных агрегатных состояниях, что не благоприятно сказывается на фауне и флоре данного региона. В работе [16] отмечено, что комплекс УВ очень сложен по составу и содержит десятки индивидуальных компонентов, различающихся физическими, химическими и токсикологическими свойствами. Попадая в почвы, УВ подвергаются сорбции органическим и минеральным веществом почв [17]. Использование вторичных ресурсов на базе современных технологий в производстве строительных материалов отвечает также общегосударственным интересам по защите окружающей среды.

Фосфатные вяжущие. Для изготовления жаростойких бетонов использовалась в качестве связующей ортофосфорная кислота H_3PO_4 в чистом виде по ГОСТ 6552-80, норма — чистый (ч.) ОКП 26 1213 0021 10. Массовая доля ортофосфорной кислоты (H_3PO_4) не менее 85%, плотность не менее $1,69 \text{ г/см}^3$.

Фосфатные вяжущие, имеющие высокую прочность после твердения способны увеличить прочность при нагревании. Они обладают высокой термостойкостью и многие из них характеризуются высокой огнеупорностью, например, при использовании отработанного катализатора, имеющего повышенное содержание Al_2O_3 , получают алюмофосфатные изделия с огнеупорностью — 1750°C .

Установлено, что основным фактором, определяющим возможность применения оксидов металлов для производства фосфатных связующих, является тепловой эффект реакций растворения оксидов и гидроксидов поливалентных металлов [18].

Оксид алюминия замедляет схватывание ОФК (ортофосфорной кислоты) и переводит ее в алюмофосфатное связующее.

Высокая химическая стойкость модифицированных фосфатами алюмосиликатных и высокоглиноземистых огнеупоров обуславливается уменьшением общей пористости и образованием в порах в процессе нагрева стабильного алюмофосфата $AlPO_4$, инертного по отношению к кислым и основным средам.

Повышенная химическая стойкость фосфатных материалов объясняется специфической структурой ортофосфатов, у которых расположенные на поверхности тетраэдры PO_4 обращенные в сторону расплава, который связан с центральным атомом "P" двойной связью и поэтому являются пассивными [18].

Технологический процесс

Технологический процесс производства бесцементных жаростойких бетонов включает в себя: приготовление формовочной массы, формования изделий и термообработку. Следует отметить, что для своего затвердевания и набора марочной прочности жаростойкие бетоны требуют особую термообработку.

Для бетонов на ортофосфорной кислоте с компонентами, представленных составами в таблице 3, — нагревание до 1200°C с подъемом температуры до 200°C со скоростью 60°C и до 1200°C — 150°C/час, выдерживание в течение 2 часов, охлаждение вместе с печью. Физико-механические свойства жаростойких бетонов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Составы для получения и физико-механические показатели жаростойких бетонов

Компоненты	Содержание компонентов, мас. %			
	1	2	3	4
1. Отработанный катализатор ИМ-220	40	42	44	45
2. Отходы углеобогащения ЦОФ «Абашевской»	40	43	44	45
3. Ортофосфорная кислота	20	15	12	10
Физико-механические показатели жаростойкого бетона, после твердения и нагревания до температуры 1200°C				
Механическая прочность на сжатие, МПа	58,8	62,3	63,5	64,1
Механическая прочность при изгибе, МПа	31,7	35,4	36,8	37,2
Морозостойкость, циклы	44	51	55	59
Термостойкость, циклы (350°C - вода 20°C)	5	7	7	6
Кислотостойкость, %	95,4	95,9	96,2	96,8

Твердение происходит в результате химического взаимодействия ортофосфорной кислоты с наполнителями, особенно с тонкомолотой ее частью, и последующих реакций полимеризации и поликонденсации, которые усиливаются по мере сушки и нагревания бетона [18]. Как видно из таблицы 3, благодаря использованию ортофосфорной кислоты в качестве связующего удастся утилизировать до 80-90% отходов химической промышленности и энергетики и получить жаростойкие бетоны с высокими физико-механическими показателями.

Обсуждение результата

В работе [19] было показано, что если в используемых отходах содержится даже в небольшом количестве наночастиц, то энергию Гиббса можно записать в следующем виде: $G_i^{нк} = G_i^{мас.} + \sigma_i f_i$, где $G_i^{нк}$ и $G_i^{мас.}$ — энергия Гиббса нанокристаллических и массивных фаз соответственно; σ_i и f_i — поверхностное натяжение и поверхность частиц i -й фазы соответственно. Это означает, что в системе появляется еще один независимый параметр — поверхность, а, следовательно, появляется дополнительная степень свободы.

Эффект от внедрения наноразмерных частиц принципиально выражается в том, что в системе появляется не только дополнительная граница раздела, но и носитель квантовомеханических проявлений [19, 20]. Присутствие в системе наноразмерных частиц способствует увеличению объема адсорбционно и хемосорбционно связываемой ими жидкости. А это приводит к уменьшению объема не только капиллярно-связанной но и свободной жидкости, что повышает пластичность формовочной массы и прочностных показателей изделий.

При уменьшении размера зерен увеличивается общая величина поверхности раздела фаз, уменьшается средний радиус кривизны выпуклых участков, растет их избыточная поверхностная энергия, уменьшаются расстояния между источниками и поглотителями вакансий в системе. Экспериментальные исследования и богатый практический опыт керамических производств подтверждают важнейшую роль степени измельчения (или

использования наноразмерных сырьевых материалов). За счет действия одного этого фактора удается в ряде случаев снизить требуемую температуру спекания на 50-100°C и более.

Выводы

Таким образом, исследовано влияние нанотехногенного высокоглиноземистого сырья — отработанного катализатора ИМ-2201 и отхода углеобогащения на физико-механические свойства жаростойких композитов на основе фосфатных связующих. Полученные жаростойкие бетоны имели высокие показатели по механической прочности, термостойкости, кислотостойкости и морозостойкости

Эффект от внедрения наноразмерных частиц принципиально выражается в том, что в системе появляется не только дополнительная граница раздела, но и носитель квантовомеханических проявлений. Присутствие в системе наноразмерных частиц способствует увеличению объема адсорбционно и хемосорбционно связываемой ими воды, которое уменьшает объем капиллярно-связанной и свободной воды, что приводит к повышению пластичности формовочной массы и прочностных показателей изделий.

Использование отходов производств в производстве строительных материалов способствует: а) утилизации промышленных отходов; б) охране окружающей среды; в) расширению сырьевой базы для получения жаростойких бетонов на основе фосфатных связующих.

Благодаря использованию ортофосфорной кислоты в качестве связующего удалось утилизировать 80-90% отходов химической промышленности и получить жаростойкие бетоны с высокими физико-механическими показателями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дадыкин В.С., Дадыкина О.В. Методика расчета необходимого прироста запасов в управлении воспроизводством минерально-сырьевой базы // Вестник Самарского государственного экономического университета. 2019. №3. С. 54-57.
2. Хасав Г.Р., Власов А.Г. Государственная кадастровая оценка в системе социально-экономического развития региона. Монография. Самара: Самарский государственный экономический университет, 2019. 200 с.
3. Абдрахимов В.З. Использование золошлакового материала и нанотехногенного карбонатного шлама в производстве кирпича на основе бейделлитовой глины // Строительство и реконструкция. 2019. №2. С. 81-89.
4. Ашихмина О.С., Суворова С.П. Проблема промышленности строительных материалов в России // Студенческий: электронный научный журнал. 2018. № 7(27). URL: <https://sibac.info/journal/student/27/103102>
5. Бархатенко В.В., Бурдонов А.Е., Зелинская Е.В., Толмачева Н.А., Головина А.В., Самороков В.Э. Исследование свойств современных строительных материалов на основе промышленных отходов // Фундаментальные исследования. 2013. № 10-12. С. 2599-2603.
6. Кальнер В.Д. Экологически ориентированная среда обитания – интегральный критерий качества жизни // Экология и промышленность России. 2019. Т.23. №11. С. 50-54.
7. Смятская Ю.А., Фазуллина А.А., Политаева Н.А., Чусова А.Н., Безбородов А.А. Очистка сточных вод от ионов железа (III) остаточной биомассой микроводорослей *chlorella sorokiniana* // Экология и промышленность России. 2019. Т.23. №6. С. 22-27.
8. Коммонер Б. Замыкающий круг. М.: Гидрометеоиздат, 1974. 280 с.
9. Дубовик О.Л. Реформа Европейского Законодательства об отходах // Российское право: образование, практика, наука. 2005. №5. С. 80-84.
10. Хлыстов А.И., Исаев Д.И. Фосфатное связывание минеральных тонкомолотых отходов промышленности // Градостроительство и архитектура. 2019. Т. 9. №3. С. 85-91.
11. Хлыстов А.И., Сульдин В.В. Повышение стойкости и долговечности жаростойких бетонов // Огнеупоры и техническая керамика. 2017. №3. С. 35-40.
12. Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Применение высокоглиноземистого и щелочноземельного нанотехногенного сырья в производстве жаростойких бетонов на основе фосфатных связующих // Экологическая химия. 2017. Том 26. №5. С. 285-290.
13. Литвинова Т.И., Пирожкова В.П., Петров А.К. Петрография неметаллических включений. М.: «Металлургия», 1972. 184 с.

14. Хлыстов А.И., Соколова С.В., Власов А.В. Повышение эффективности жаростойких композитов за счет применения химических связующих // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2012. №9. С. 38-42.
15. Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Цибарт А.С., Смирнова М.А. Углеводороды в почвах: происхождение, состав, поведение // Почвоведение. 2015. №10. С. 1195-1209.
16. Mao D., Lookman R., Van de Weghe H., Weltens R., Vanermen G., De Brucker N., Dies L. Estimation of ecotoxicity of petroleum hydrocarbon mixtures in soil based on HPLC – GCXGC analysis // Chemosphere. 2009. V. 77. N 1. P. 1508-1513.
17. Barnes D.L., Chuvilin E. Migration of Petroleum in Permafrost-Affected Regions // Soil Biol. 2009. V. 16. P. 263-278.
18. Хлыстов А.И., Абдрахимов В.З., Ковков И.В. Экологические и практические аспекты использования пиритных огарков и высокоглиноземистых отходов нефтехимии в производстве безобжиговых огнеупорных композитов // Огнеупоры и техническая керамика. 2009. №4-5. С. 35- 42.
19. Абдрахимов В.З., Колпаков А.В. Инновационные направления использования кальцийсодержащего нанотехногенного сырья: осадок-отхода сточных вод, отхода пыли-уноса асфальтобетонных заводов, шлама от водоочистки воды и гальванического шлама в производстве кирпича // Известия вузов. Строительство. -2013. №8. С. 41-46.
20. Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. К вопросу использования алюмосодержащего нанотехногенного сырья в производстве керамических композиционных материалов // Материаловедение. 2014. №12. С. 44-50.

REFERENCES

1. Dadykin V.S., Dadykin O.V. The methodology for calculating the necessary increase in reserves in managing the reproduction of the mineral resource base // Bulletin of Samara State University of Economics. 2019. №3. S. 54-57.
2. Khasaev G.R., Vlasov A.G. State cadastral valuation in the system of socio-economic development of the region. Monograph. Samara: Samara State University of Economics, 2019. 200 p.
3. Abdrakhimov V.Z. The use of ash and slag material and nanotechnogenic carbonate sludge in the production of bricks based on beidellite clay // Construction and reconstruction. 2019. №2. S. 81-89.
4. Ashikhmina O.S., Suvorova S.P. The problem of the building materials industry in Russia // Student: electronic scientific journal. 2018. No. 7 (27). URL: <https://sibac.info/journal/student/27/103102>.
5. Barakhtenko V.V., Burdonov A.E., Zelinskaya E.V., Tolmacheva N.A., Golovkina A.V., Samorokov V.E. The study of the properties of modern building materials based on industrial waste // Basic research. 2013. No. 10-12. S. 2599-2603.
6. Kalner V.D. Ecologically oriented habitat - an integral criterion for the quality of life // Ecology and Industry of Russia. 2019. V. 23. No. 11. P. 50-54.
7. Smyatskaya Yu.A., Fazullina A.A., Politaeva N.A., Chusova A.N., Bezborodov A.A. Wastewater treatment of iron (III) ions by the residual biomass of microalgae chlorella sorokiniana // Ecology and Industry of Russia. 2019. V.23. No. 6. P. 22-27.
8. Commoner B. The closing circle. M.: Gidrometeoizdat, 1974. 280 p.
9. Dubovik O.L. Reform of the European Legislation on Waste // Russian Law: Education, Practice, Science. 2005. No 5. P. 80-84.
10. Khlystov A.I., Isaev D.I. Phosphate binding of mineral fine-ground industrial wastes // Urban planning and architecture. 2019. Vol. 9. No. 3. P. 85-91.
11. Khlystov A.I., Suldin V.V. Improving the resistance and durability of heat-resistant concrete // Refractories and technical ceramics. 2017. No. 3. S. 35-40.
12. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. The use of high-alumina and alkaline-earth nanotechnogenic raw materials in the production of heat-resistant concrete based on phosphate binders // Ecological chemistry. 2017. Vol. 26. No. 5. S. 285-290.
13. Litvinova T.I., Pirozhkova V.P., Petrov A.K. Petrography of non-metallic inclusions M.: Metallurgy, 1972. 184 p.
14. Khlystov A.I., Sokolova S.V., Vlasov A.V. Improving the efficiency of heat-resistant composites through the use of chemical binders // Building materials, equipment, technologies of the XXI century. 2012. №9. WITH. P.38-42.
15. Gennadiev A.N., Pikovskiy Yu.I., Zibert A.S., Smirnova M.A. Hydrocarbons in soils: origin, composition, behavior // Pedology. 2015. N10. P. 1195-1209.
16. Mao D., Lookman R., Van de Weghe H., Weltens R., Vanermen G., De Brucker N., Dies L. Estimation of ecotoxicity of petroleum hydrocarbon mixtures in soil based on HPLC – GCXGC analysis // Chemosphere. 2009. V. 77. N 1. P. 1508-1513.

17. Barnes D.L., Chuvilin E. Migration of Petroleum in Permafrost-Affected Regions // Soil Biol. 2009. V. 16. P. 263-278.
18. Khlystov A. I., Abdrakhimov V.Z., Kovkov I.V. Ecological and practical aspects of the use of pyrite cinder and high-alumina petrochemical waste in the production of non-ignition refractory composites // Refractories and technical ceramics. 2009. №4-5. P. 35 - 42.
19. Wu G., Zhu X., Ji H., Chen D. Molecular modeling of inter actions between heavy crude oil and the soil organic matter coated quartz surface // Chemosphere. 2015. V. 119. P/ 242-249.
20. Huesemann M.H., Hausmann T.S., Fortman T.J. Does Bioavailability limit biodegradation? Acomparision of hydrocarbon biodegradation and desorption rates in aged soils // Biodegradation. 2014. V. 15. P. 261-274.

Информация об авторах:

Абдрахимов Владимир Закирович

Самарский государственный экономический университет, г. Самара, Россия,
доктор технических наук, профессор кафедры землеустройства и кадастров.
E-mail: 3375892@mail.ru

Абдрахимова Елена Сергеевна

Самарский университет (Национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева),
г. Самара, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры химии.
E-mail: 3375892@mail.ru

Information about authors:

Abdrakhimov Vladimir Z.

Samara State University of Economics, Samara, Russia,
doctor of technical sciences, professor of Land Management and Cadastres Department.
E-mail: 3375892@mail.ru

Abdrakhimova Elena S.

Samara University (National Research University named after Academician S.P. Koroleva), Samara, Russia,
candidate of technical sciences, associate professor of Chemistry Department.
E-mail: 3375892@mail.ru

N.G. VOLKOVA¹, E.Y. TSESHKOVSKAYA¹¹Scientific – Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), Moscow, Russia

CONCERNING THE FACTORS FORMING THE HUMIDITY MODE OF BUILDINGS

Abstract. Climate change affects cities and settlements in the Russian Federation. In addition to the increase in outdoor air temperature, its relative humidity also changes. Increasing humidity in the internal environment of buildings leads to negative phenomena, such as dampness of the room, which has a negative impact on the well-being of people and the safety of buildings' enclosing structures. In some cases, in addition to General exchange ventilation, it is possible to regulate the humidity state of the premises by using a sorbing material as a lining for the interior surface of the premises. In NIISF RAASN, analytical and mathematical studies of the humidity state of premises in the annual operation cycle were conducted, which showed that the relative humidity in the room can be regulated by using the correct selected sorbing material.

Keywords: climate change, external and internal sources of moisture, regulation of humidity, conditions of premises, dampness.

Н.Г. ВОЛКОВА¹, Е.Ю. ЦЕШКОВСКАЯ¹¹Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва, Россия

О ФАКТОРАХ, ФОРМИРУЮЩИХ ВЛАЖНОСТНЫЙ РЕЖИМ ЗДАНИЙ

Аннотация. Изменение климата влияет на города и поселки в Российской Федерации. Помимо повышения температуры наружного воздуха изменяется и его относительная влажность. Повышение влажности внутренней среды зданий приводит к негативным явлениям, таким как сырость в помещении, что негативно сказывается на самочувствии людей и безопасности ограждающих конструкций зданий. В некоторых случаях, помимо общеобменной вентиляции, можно регулировать влажностное состояние помещения с помощью сорбирующего материала в качестве облицовки внутренней поверхности помещения. В НИИСФ РААСН были проведены аналитические и математические исследования влажностного состояния помещений в годовом цикле эксплуатации, которые показали, что относительную влажность в помещении можно регулировать с помощью правильно подобранного сорбирующего материала.

Ключевые слова: изменение климата, внешние и внутренние источники влаги, регулирование влажности, условия помещений, сырость.

Introduction

The average surface temperature of the Earth over the past 100 years has increased by 0.74 °C, which has affected the nature of precipitation. By the anomaly of the surface temperature of the air (see figure 1) you can observe the trend of climate change. Extreme weather events have become more intense and frequent. Since the 1960 s, the number of registered weather-related disasters has more than tripled [1, 2]. Climate change in some cases has a devastating impact on buildings and construction objects. In recent decades, the intensity of heavy rains has increased, leading to an increase in the proportion of buildings with dampness problems, especially in flood-prone areas, river valleys and coastal areas. According to forecasts, the number of winter floods will continue to increase in the countries of North-Western Europe, and flood-in all countries of the European Region [3, 4].

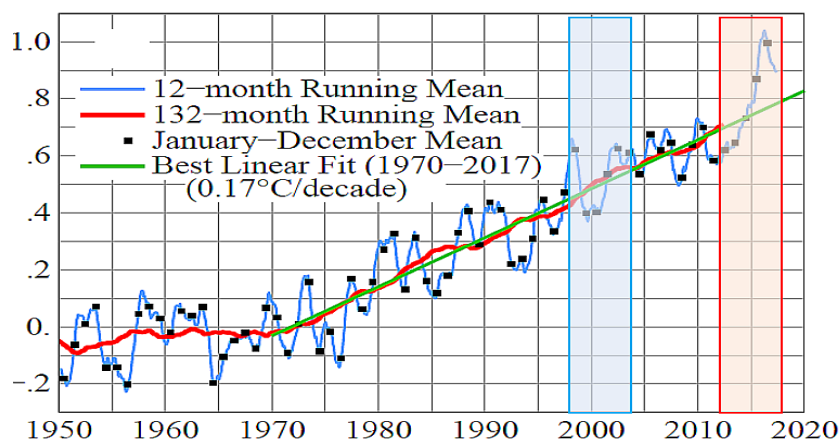


Figure 1 - Global anomalies in surface air temperature (until November 1917), according to NASA GISS.
The author of the analysis is Igor Ezau, Ph.D., Ph.D., a senior researcher at the Center for Remote Sensing of the Earth and Environmental Studies. F. Nansen and the Climate Research Center. V. Björknes, Bergen, Norway

Construction objects and structures depend on external influences, the nature of which should be taken into account when designing and operating buildings. [5, 6]. The internal environment of the premises is largely affected by the external air [7]. Climate characteristics are widely used in the construction industry in the development of measures to ensure internal comfort, energy conservation of buildings and their safety. Specialists of the NIISF RAASN have been developing climate standards based on meteorological observations.

Method

The research method is based on calculations of normative values of climatic parameters. Currently, the normative document SP 131 13330 2018 is valid. "SNiP 23-01-99 * Building Climatology", which was developed with the participation of specialists from the main geophysical observatory named after A.I. Voyeykova (FSBI GGO) Roshydromet.

An analysis of the standard values presented for the 50-year period of observations allowed us to note a significant excess of precipitation in the cold period of the year, with a relative humidity of 55 to 60 % (figure 2). During the warm season precipitation is decreasing, but the relative humidity exceeds 80% . Thus, in winter, ventilation can not be a full-fledged method of regulating humidity, since cold outdoor air has a very low moisture content, which can lead to a decrease in the humidity of the room relative to the standard values. In the summer, outdoor air may increase the humidity of the indoor environment when the room is ventilated. The parameters of the microclimate of premises are presented in the normative documents: GOST 30494-2011. "Residential and public buildings. Parameters of microclimate in buildings" and SanPiN 2.1.2.2645-10 "Sanitary and epidemiological requirements for living conditions in residential buildings and premises". In the cold period of the year, the optimal value of relative humidity should be in the range of 30-45%, and the permissible value - < 60%. In the warm season, the optimal and permissible relative humidity should be in the range of 30-60 % and not exceed 65 %.

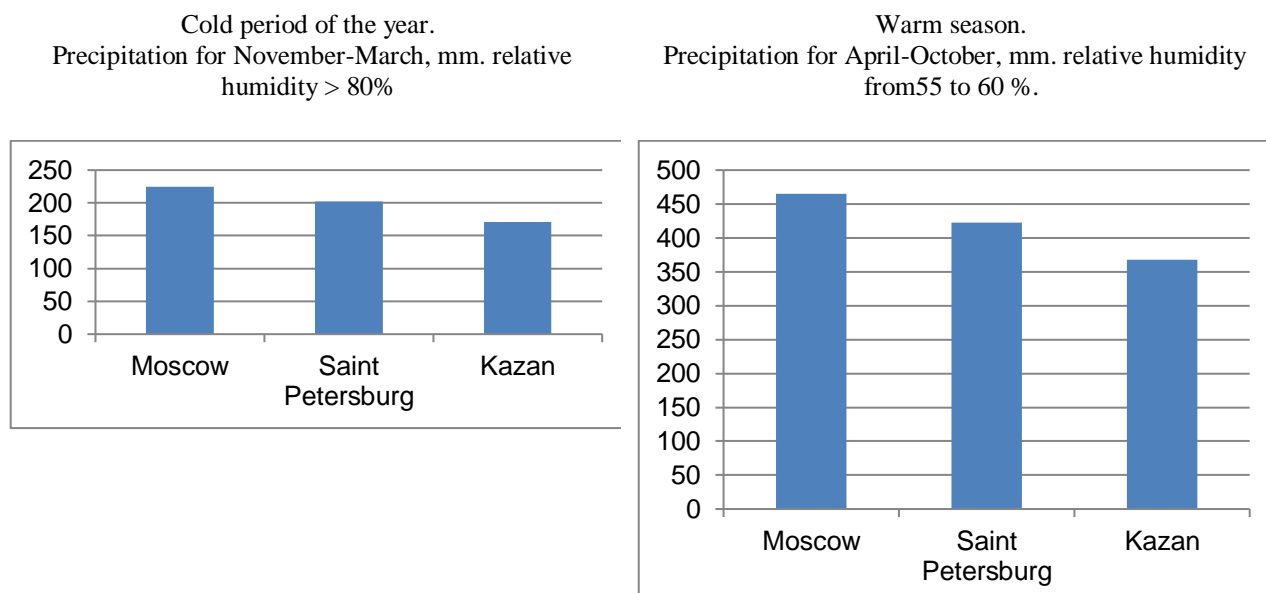


Figure 2 - The amount of precipitation cold and warm periods of the year in cities of the Russian Federation

During the heating period, the relative humidity has low values that go beyond its standard value of 35%. External and internal sources of moisture supply contribute to an increase in the relative humidity of indoor air (table 1). Regulation of the air environment parameters of residential and public buildings, including its relative humidity, can improve the quality of the microclimate of premises.

Table 1 - External and internal sources of moisture

External	Anthropogenic		Other sources
Rain	Breath	Cooking	Animals
Snow	Sweat	Cleaning	Plants
Flow	Bath and shower	Clothes washing and drying	Aquariums
Subsoil waters	Dish Washing		

Results of observations

With the onset of the cold period up to January for residential premises humidity, as a rule, meets the standards, and then additional humidification of the room is required. During the warm period, humidity almost always exceeds the permissible standard value of 65%. The presence of additional sources of moisture release can lead to an increase in humidity up to 100 %. The use of ventilation can reduce humidity to 70-80 %. [8,9].

NIISF RAASN with the participation of the main geophysical Observatory. A. I Voey-Kova (GGO) of the Federal hydrometeorological service of the Russian Federation based on observation data for the period from 1980-2011 developed the climate parameters of Moscow. Based on the conducted research, the parameters of a typical year were obtained, with hourly values of meteorological elements that allow the use of energy-saving technologies in the design of buildings and structures [10,11]. However, the use of hourly values leads to an increase in the amount of information to complicate the calculations and increase the cost of machine time. In Russian practice, meteorological observations are made in three hours. This interval is also useful when forming a Bank of climate standards for a typical year. Table 2 shows the temperature and humidity characteristics of outdoor air during the coldest days of the heating season in Moscow. The analysis of the territory's climate parameters over several decades allows us to characterize the state of its climate system. Changes in the General circulation of air flows in the Northern hemisphere and the "greenhouse effect" led to a General warming of the climate in Moscow: the average annual temperature for this period was 4.1 oC, exceeding the average annual temperature of the previous 30-year period by 0.8 OC. There is a tendency to a significant repeatability in the cold period of a

combination of relatively high (above 0 ° C) air temperature with increased (more than 70 %) humidity, which leads to thaws that negatively affect the construction of buildings, structures, communications, and worsen health. The infiltration of outdoor air, when using window blocks made of "breathing" wood, is disturbed. Miscalculations in design and construction can lead to wet walls or corner parts of the building during rain, and in cold weather the wall can freeze. This is also true for damp basements, which are a source of mold that can spread throughout the premises through ventilation channels. The relative humidity at which some types of fungi germinate is 62-65%. Compliance with the standard values does not exclude the appearance of moisture on cold internal surfaces and in building structures. So, dust mites can exist at a relative humidity above 45-50%, in order to avoid their reproduction, the relative humidity in homes during the heating season should be lower than this value [12].

A changing climate, urbanisation and its associated environmental problems have an impact on the internal conditions of the premises. In this regard, there is a need to develop a new systematic approach to assessing the quality and formation of the internal environment of buildings. The data presented in tables 2 and 3 indicate some changes in the climate system of Moscow.

Table 2 - Temperature and humidity characteristics of the outdoor air on the coldest days of Moscow, presented in three-hour intervals

Climate Characteristics	Three-hour intervals of the climatic parameters during the coldest times of the day							
	0-2	3-5	6-8	9-11	12-14	15-17	18-20	21-23
Temperature	-8,7	-9,4	-9,1	-7,7	-6,6	-6,9	-7,5	-7,6
Relative Humidity	82	84	83	78	78	75	78	83

Table 3 shows the temperature and humidity characteristics of the outdoor air on the warmest days of the summer period in Moscow.

Table 3 - Temperature and humidity characteristics of the outdoor air of the warmest days of the summer period of the year in Moscow, presented in three-hour intervals

Climate Characteristics	Three-hour Intervals of the climatic parameters during t warmest the times of the day							
	0-2	3-5	6-8	9-11	12-14	15-17	18-20	21-23
Temperature	16,3	17,3	20,2	22,9	23,9	23,2	20,6	17,7
Relative Humidity	87	85	72	65	59	63	66	85

Along with the increase in outdoor air temperature, its relative humidity also increased . The process of moisture formation in the room is not constant, the humidity level changes periodically. The ability of building and finishing materials to absorb and release moisture affects fluctuations in the humidity level in the room [13,14]. Dampness control in order to avoid the formation of excessive humidity in structures requires proper temperature control and ventilation. To combat dampness, it is necessary to avoid the formation of stagnant air zones when ventilating premises.

Excess moisture on almost any surface contributes to the growth of micro-organisms such as mycelial fungi (mold) and other types of fungi, as well as bacteria, which then become a source of air pollution by spores, cells, parts, and volatile organic compounds. In addition, dampness causes biological decomposition of materials. Humidification of building materials contributes to their chemical destruction, which increases the level of emission of volatile organic compounds (including formaldehyde), leading to the destruction of building structures. The incidence increases in geographical areas with high air temperature and high humidity. When the temperature increased to 40°C and humidity to 60%, the release of formaldehyde from building materials and furniture was recorded at levels 1.5–2.5 times higher than normal [15]. Compliance with the rules of design, construction and operation of building envelope structures is key to preventing and controlling

excessive humidity that leads to the growth of microorganisms. It should also be noted poorly ventilated areas with moisture sources such as kitchens, bathrooms, swimming pools.

When waterproofing of enclosing structures is violated, when using porous building materials, capillary absorption of rain and ground water moisture occurs. The contact area of the building with the ground base is often larger than the surface of the shell in contact with the outside air [16]. The layout of modern apartments does not involve Windows in bathrooms and bathrooms and sufficient effective ventilation. Meanwhile, as a result of drying clothes or water treatments, humidity increases.

During warm and humid weather, outside air that penetrates through cracks and holes in the building envelope can cause condensation to form on cold surfaces of engineering systems. In cold weather, the ex-filtration of warm humid air from the premises into the enclosing structures leads to condensation of moisture in cracks in walls and ceilings, as well as in attics. Experiments on the behavior of materials have shown the destructive effect of microorganisms on building structures, leading to a decrease in strength indicators, the destruction of concrete products and brickwork. The calculation of the cost of restoring structures may be commensurate with the size of the damage from biological damage [17].

Indoor air pollution by micro-organisms is caused by hundreds of species of bacteria and fungi that grow in rooms with a sufficient level of humidity. The elimination of dampness in the premises can be considered as a measure to combat their adverse effects. Health disorders include an increase in the frequency of respiratory symptoms, allergies, asthma, and other pathological immune responses. Scientists have proved that the constant presence of fungal spores in the body increases the risk of cancer, the most dangerous fungi include black mold.

In NIISF RAASN, work was performed to Refine the parameters of the micro-climate of residential and public buildings, within which search studies were conducted to study and evaluate the comfort and safety of the internal environment of premises. It was found that the annual dynamics of changes in relative humidity, formed by non-stationary changes in the temperature and humidity state of outdoor air, can range from 10% to 90% and significantly exceed the limits set by regulatory documents. Studies of external influences were conducted for the external atmosphere corresponding to the Moscow region. To regulate the humidity regime of buildings' premises, wall cladding was considered as a sorbing material. The change in outdoor humidity is shown in figure 3. Atmospheric air data is obtained from the revised archive data (Moscow VVC) (for the beginning of the countdown at 00.00 hours on January 1, 2013) with details within each day [18].

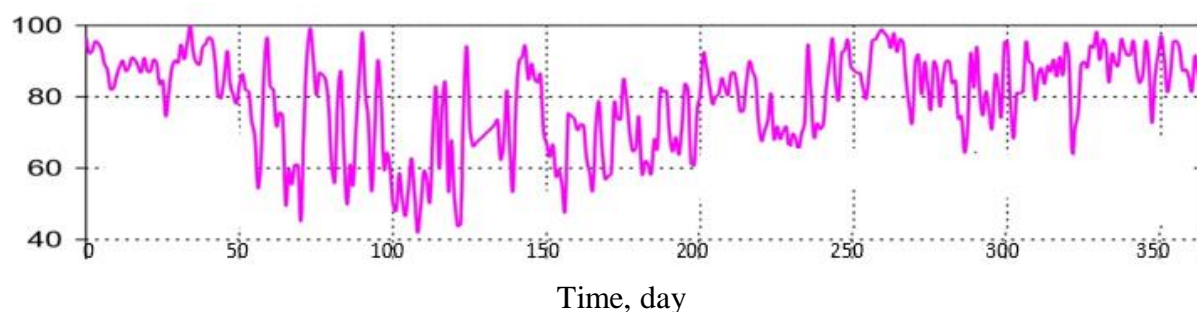


Figure 3 - Relative humidity of outdoor air

During the research, the requirements for the lining of internal surfaces of fences were evaluated. Figure 4 shows the calculated data of relative humidity in the room depending on the sorption properties of the material used for finishing the interior surfaces of the room.

In construction practice, it is customary to take into account the influence of the sorption effect on the moisture content of the material itself. The influence of sorption as a means of regulating humidity during long-term operation of premises has not been practically studied. The use of indoor sorbing material may be sufficient to ensure a standard humidity regime for most of the year. During the cold period, the average indoor humidity is about 30% for January-March and

more than 40% for November-December. During the warm period, humidity does not rise more than 75% and can exceed the standard value of 65% in fact only in summer. Calculations have shown that the damping properties of the sorbent in the form of wood are so effective that they can reduce humidity fluctuations several times within a single day. The results obtained allow to smooth out humidity fluctuations in premises by using water vapor-absorbing materials and efficient operation of ventilation systems.

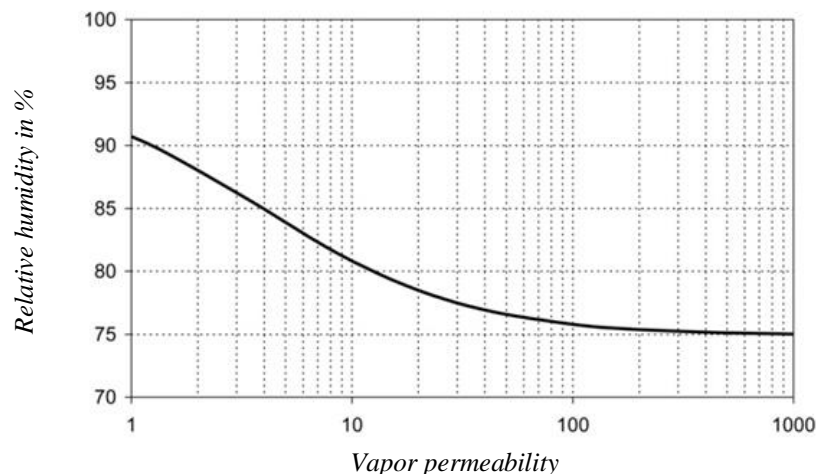


Figure 4-relative humidity in the room on one of the most unfavorable days, depending on the vapor permeability of the coating of wood veneer N•1010 kg/PA/m²/s

Conclusion

The development of a new ecostrategy is aimed at improving the quality of life and health of the population of the Russian Federation by ensuring the quality of the indoor environment and its safety. Public policy should be based on a scientific approach that is common to hygienists, physicians, ecologists, architects, designers and builders, including: the impact of the outdoor environment, assessment of microclimatic parameters of the environment; determination of air exchange and effective ventilation; selection of environmentally friendly types of construction and finishing materials; assessment of fungal and bacterial contamination.

Assessment of the humidity regime of premises is one of the most important tasks stated in the social project "Housing and urban environment", aimed at ensuring the health and longevity of the population of our country by improving the quality of the internal environment of buildings. Preserving the health of the people, reducing the death rate, and increasing the life expectancy of people largely depends on the microclimate of the room.

REFERENCES

1. Newsletter of the who. Climate change and health. February 1, 2018.
2. The Madrid conference of the UN on climate change. December 2-16, 2019.
3. Who fact sheet. Copenhagen and Parma, March 12, 2010. The Impact of climate change on public health: hard facts.
4. Kobicheva N.V., Akentieva E.M., Galiyk L.P. Klimaticheskie riski i adaptaziya k izmeneniy i izmentivosti klimata v texnitheskoj sfere. Ftderalinaya slytba po gidrometeorologii i monitoringy okruthayithei sredi i gl. geofizitheskaya observatoriya im. A.I. Voeikova. Izd-vo OOO «Kirillitcha», Niznii Novgorod, 2015. 213 s.
5. Volkova N. Spethifika vozdyshnix prostranstv bolishix gorodov. Fyndamentalnie, poiskovie i prikladnie issledovanya RAASN po naythnomy obespetheniy razvitiya arxetiktyri, gradostroitelstva i stroitelnoi otrasli RF v 2018 g. T. 2.M. 2019. S.138-148.
6. Volkova N., Tseshkovskay E. The role of negative factors in the formation of the microclimate of premises // Facade system. № 4 (48). 2019. S. 48-52.

7. Volkova N. «O vzaimoobyslovlennosti klimata I ekologii» // Sbornik dokladov VII Megdynarodnoi naychno-tehnichskoi konferentsii, posvayaschnnoi 90-letiy so dnya obrazovaniya fakyliteta TGV MISI-MGSY. Teoreticheskie osnovi teplogazosnabgeniya i ventillyathii M. MISI-MGSY, 2019. S. 32-39.
8. Stefanov E.V. Ventilation and air conditioning. AVOK-SEVERO-ZAPAD publishing house, Saint Petersburg, 2005. 399 p.
9. Fanger O.R. Indoor air Quality in the twenty-FIRST century in search of perfection // AVOK, journal of heating, ventilation, air conditioning, heat supply and construction Thermophysics. 2000. No. 2. Pp. 88-93.
10. Akentieva E.M., Kobysheva N.V. Strategy of adaptation to climate change in the technical sphere for Russia // Trudy GU "GGO", S. - Pb. 2011. Vol.563. P. 60-77.
11. Volkova N.G. To the choice of universal "typical year" // Technology of the textile industry. 2017. No. 2. Pp. 327-330.
12. "Who recommendations on indoor air quality: dampness and mold", world health organization, 2014.
13. Elchishcheva T.F. Determination of the humidity regime of premises of buildings in the presence of hygroscopic salts in the wall material // Building materials. 2017. No. 6. Pp. 14-18.
14. Gagarin V.G., Pastushkov P.P., Reutova N.A. On the question of the purpose of the calculated humidity of building materials for the sorption isotherm // Construction and reconstruction. 2015. No. 4. Pp. 152-155.
15. Nikiforova N.V., May I.V. On the problem of normalizing the migration of formaldehyde from polymer-containing construction, finishing materials and furniture // Hygiene and sanitation. 2018. No. 1. Pp. 43-49.
16. Levin E.V., Okunev A.Yu. Heat transfer in soil foundations of buildings. Influence of the insulated blind area // Construction and reconstruction. 2019. No. 3. Pp. 83-93.
17. Erofeev V.T., Rodin A.I., Dergunova A.V., Suraeva E.N., Smirnov V.F., Bogatov A.D., Kaznacheev S.V., Karpushin S.N. Biological and climatic stability of cement composites // Academia architecture and construction. 2016. No. 3. Pp. 119-126.
18. Levin E.A. Okynev A. Non-stationary humidity regime of residential premises and the effect of water vapor sorption on it // Academia. Arxitectyra i stroitelstvo. № 4. 2018. C. 130-136.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационный бюллетень ВОЗ. Изменение климата и здоровье. 1 февраля 2018 г.
2. Мадридская конференция ООН по климату. 2–16 декабря 2019 г.
3. Фактологический бюллетень ВОЗ. Копенгаген и Парма, 12 марта 2010 г. Влияние изменения климата на здоровье населения: убедительные факты.
4. Кобышева Н.В., Акентьева Е.М. Галюк Л.П. Климатические риски и адаптация к изменению и изменчивости климата в технической сфере Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и гл. геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова. Изд-во ООО «Кириллица». Нижний Новгород. 2015. 213 с.
5. Волкова Н.Г. Специфика воздушных пространств больших городов. Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли РФ в 2018 г. Т. 2.М. 2019. С.138-148.
6. Волкова Н.Г., Цешковская Е.Ю. Роль негативных факторов в формировании микроклимата помещений // Фасадные Системы. № 4 (48) 2019 С. 48-52.
7. Волкова Н.Г. О взаимообусловленности климата и экологии // Сборник докладов VII Международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня образования факультета. ТГВ МИСИ – МГСУ. Теоретические основы теплоснабжения и вентиляции. М. МИСИ – МГСУ, 2019. С. 32-39.
8. Стефанов Е.В. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Издательство «АВОК – СЕВЕРО-ЗАПАД» Санкт-Петербург, 2005. 399 с.
9. Фангер О.Р. Качество внутреннего воздуха в XXI веке в поисках совершенства // АВОК, журнал по отоплению, вентиляции, кондиционированию воздуха, теплоснабжению и строительной теплофизике 2000. № 2. С. 88-93
10. Акентьева Е.М., Кобышева Н.В. Стратегия адаптации к изменению климата в технической сфере для России // Труды ГУ «ГГО», С.-Пб. 2011. Вып.563. С. 60-77.
11. Волкова Н.Г. К выбору универсального «типового года» // Технология текстильной промышленности. 2017. № 2. С. 327-330.
12. «Рекомендации ВОЗ по качеству воздуха в помещениях: сырость и плесень», Всемирная организация здравоохранения, 2014.
13. Ельчищева Т.Ф. Определение влажностного режима помещений зданий при наличии в стеновом материале гигроскопических солей // Строительные материалы. 2017. № 6. С. 14-18.
14. Гагарин В.Г., Пастушков П.П., Реутова Н.А. К вопросу о назначении расчетной влажности строительных материалов по изотерме сорбции // Строительство и реконструкция. 2015. № 4. С. 152-155.

15. Никифорова Н.В., Май И.В. К проблеме нормирования миграции формальдегида из полимеросодержащих строительных, отделочных материалов и мебели // Гигиена и санитария. 2018. № 1. С. 43-49.
16. Левин Е.В., Окунев А.Ю. Теплоперенос в грунтовых основаниях зданий. Влияние утепленной отмостки // Строительство и реконструкция. 2019. № 3. С. 83-93.
17. Ерофеев В.Т., Родин А.И., Дергунова А.В., Сураева Е.Н., Смирнов В.Ф., Богатов А.Д., Казначеев С.В., Карпушин С.Н. Биологическая и климатическая стойкость цементных композитов // Academia архитектура и строительство. 2016. № 3. С. 119-126.
18. Левин Е.В., Окунев А.Ю. Нестационарный влажностный режим жилых помещений и влияние на него сорбции паров воды // Academia. Архитектура и строительство. 2018. №4. С. 130-136.

Information about authors:

Volkova Nadezhda G.

Scientific – Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), Moscow, Russia,
candidate of sciences (Engineering), veda's. scientific staff member laboratory «The physics of low-inertia fencing and building climatology».
E-mail: vngео12@yandex.ru

Tseshkovskaya Elena Yu.

Scientific – Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), Moscow, Russia,
engineer, leading engineer of laboratory «Environmentally safe technologies and structural systems».
E-mail: niisf103@mail.ru

Информация об авторах:

Волкова Надежда Георгиевна

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Теплофизика малоинерционных ограждений и строительная климатология».
E-mail: vngео12@yandex.ru

Цешковская Елена Юрьевна

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва, Россия,
инженер, ведущий инженер лаборатории «Экологобезопасные технологии и конструктивные системы».
E-mail: niisf103@mail.ru

С-А.Ю. МУРТАЗАЕВ^{1,2}, М.Ш. САЛАМАНОВА^{1,2}¹Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова,
г. Грозный, Россия²Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова Российской академии наук,
г. Грозный, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ НАПОЛНЕННЫХ ВЯЖУЩИХ СИСТЕМ ЩЕЛОЧНОЙ АКТИВАЦИИ

Аннотация. Антропогенная нагрузка на природно-ресурсный потенциал планеты стремительно растет, поэтому особое внимание уделяется разработке менее затратных и мало энергоемких технологий получения новых строительных материалов, реализация которых не требует высокотемпературной и дорогой технологической обработки, и позволит использовать местные вторичные и некондиционные сырьевые материалы. Разработка рецептур бесклинкерных вяжущих связок щелочной активации на основе тонкодисперсных порошков природного и техногенного происхождения позволит получать новые эффективные строительные композиты. В работе раскрываются вопросы, связанные с теоретическими основами формирования структуры и прочности цементного камня на основе щелочного активатора. Результаты исследований, на наш взгляд, безусловно представляют практическую значимость для строительной отрасли, так как предлагаемые рецептуры бесклинкерных цементов способны заменить дорогой и энергоемкий портландцемент, позволяя создавать прочные и долговечные бетонные и железобетонные конструкции.

Ключевые слова: портландцементный клинкер, аспирационная пыль, пыль электрофильтров, щелочные металлы, дисперсность, вращающаяся печь, клинкерная пыль.

S-A. YU. MURTAZAEV^{1,2}, M. SH. SALAMANOVA^{1,2}¹Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov,
Grozny, Russia²Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia

RESEARCH OF PROPERTIES OF MULTI-COMPONENT FILLED ALKALINE ACTIVATION KNITTING SYSTEMS

Abstract. The anthropogenic load on the planet's natural resource potential is growing rapidly, therefore, special attention is paid to the development of less costly and low energy-intensive technologies for obtaining new building materials, the implementation of which does not require high-temperature and expensive technological processing, and will allow the use of local secondary and substandard raw materials. The development of formulations of clinker-free binders of alkaline activation based on fine powders of natural and technogenic origin will allow to obtain new effective building composites. The paper reveals issues related to the theoretical foundations of the formation of the structure and strength of cement stone based on an alkaline activator. The research results, in our opinion, undoubtedly are of practical importance for the construction industry, since the proposed recipes for clinker-free cements can replace expensive and energy-intensive Portland cement, allowing you to create strong and durable concrete and reinforced concrete structures.

Keywords: portland cement clinker, suction dust, electrostatic precipitator dust, alkali metals, dispersion, rotary kiln, clinker dust.

Введение

На протяжении развития цивилизации человечество стремилось создать и обосновать природу вяжущих свойств и объяснить закономерности протекания физико-химических

процессов схватывания, набора и наращивания прочности. Такие ученые-изобретатели как Д. Аспдин, Е. Челиев, Д. Паркер, Л. Вика, Д. Менделеев, А. Шуляченко, И. Малюга, Н. Белелюбский, В. Кинд, В. Юнг, В. Журавлев, П. Ребиндер, Ю. Бутт, Д. Бернал, С. Брунауэр, Х. Тейлор и др. являются основоположниками становления химии вяжущих материалов. Несмотря на многообразие минеральных вяжущих веществ лидирующим среди них, безусловно, является портландцемент [1-3].

Производство портландцемента на мировом уровне в 2018 году достигло 4,1 млрд. тонн, и оно стремительно растет из года в год за счет развивающихся стран. Один только Китай в 2018 году произвел 2 370 млн. тонн или 57,6% от мирового объема. Высокие показатели, а также высокие темпы роста производства демонстрируют Турция, Вьетнам и Индонезия, которые скорее всего в ближайшие 5 лет обойдут США [4-6].

Конечно, с одной стороны, это положительная тенденция, но, с другой возрастают объемы, выделяющегося при производстве цемента, углекислого газа. Установлено, что при обжиге 1 тонны портландцементного клинкера образуется 0,37 тонны углекислого газа в результате диссоциации карбоната кальция; в тоже время вырабатывается еще дополнительная порция около 0,35 тонн CO_2 при сжигании технологического топлива. Мировая цементная промышленность занимает одно из ведущих мест после электроэнергетики и транспорта по образованию парниковых газов (5-8 %). Расходуется огромное количество углекислоты, которое в течение миллиардов лет консервировалось в горных породах и минералах различного генезиса, что в итоге сказывается на экологической обстановке тропосферы [7- 9, 12].

Поэтому основной проблемой исследователей является снижение выделяющейся углекислоты, пылеуноса, вредных выбросов, которые образуются в процессе карбонатной технологии портландцемента. В качестве конкурента портландцементу в будущем можно считать вяжущее щелочной активации на основе техногенных и природных минеральных порошков [10, 11, 21].

В нашей стране на протяжении многих лет до настоящего времени не прекращаются работы по развитию экспериментального и промышленного внедрения бесклинкерной технологии. Использование вторичных сырьевых материалов и некондиционного материала с химическим составом идентичным доменным шлакам черной металлургии позволит расширить область производства строительных композитов щелочного затворения.

В качестве альтернативной замены шлакам черной металлургии, можно использовать горные породы алюмосиликатной и кремнеземистой природы, подвергнутые термообработке при 600 – 750 °С, что позволяет значительно сократить расход топлива и уменьшить выбросы в атмосферу углекислоты при работе вращающихся печей [14, 16]. Бесклинкерная технология щелочной активации нашла применение при использовании горных пород магматического происхождения, золы–уноса ТЭС, красного шлама, отходов горно-обогатительных комбинатов, к тому по стоимости эти композиты реально сопоставимыми с традиционным бетоном [13-18]. Использование термоактивированных каолиновых глин, активированных щелочными растворами, способствовало образованию достаточно прочного, термиче- и коррозионностойкого материала с низкой истираемостью [19, 20]. Еще одной разработкой бесклинкерных композитов щелочного затворения является вяжущее, полученное из природных минеральных порошков с большим содержанием окислов железа [17]. Полученные ферросиликатные новообразования носят весьма сложный характер $(\text{Ca}, \text{Na})-(\text{Fe}-\text{O})-(\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-)$, свойства композитов отличаются высокой прочностью и долговечностью.

Анализируя приведенные выше результаты исследований, можно отметить следующие отличительные характеристики бесклинкерных вяжущих щелочного затворения: экологичность, долговечность, высокая коррозионная стойкость и стойкость против действия

щелочных и щелочноземельных металлов, так как они становятся неотъемлемой частью цементного щелочного камня.

Модели и методы

В данной работе представлены результаты разработок по получению бесклинкерных вяжущих щелочной активации с использованием местного сырьевого ресурса. Многокомпонентные наполненные вяжущие системы щелочного затворения приготавливали с использованием тонкодисперсных порошков из горных пород осадочного и магматического происхождения: окремненного мергеля Веденского месторождения, барханных песков Шелковского месторождения, вулканического туфа из Кабардино-Балкарской Республики. Аспирационная и клинкерная цементные пыли электрофильтров помолу не подлежали, удельная поверхность их составила $S_{уд}$ 210 м²/кг и 280 м²/кг соответственно.

Энергодисперсионный микроанализ исследуемых порошков проведенный с помощью растрового электронного микроскопа Quanta 3D 200 i, показал существенное различие в химическом составе минеральных добавок:

– вулканический туф, %: MgO = 0,20; Al₂O₃ = 13,57; SiO₂ = 73,67; K₂O = 6,00; CaO = 1,79; Fe₂O₃ = 1,52; TiO₂ = 2,85; ппп = 0,40.

– окремненный мергель: MgO = 1,10; Al₂O₃ = 5,47; SiO₂ = 28,7; Na₂O = 1,09; CaO = 61,53; Fe₂O₃ = 2,12.

– барханные пески, %: MgO = 2,41; Al₂O₃ = 7,81; SiO₂ = 59,54; K₂O = 1,44; CaO = 17,52; Fe₂O₃ = 2,60; Na₂O = 1,35; SO₃ = 0,21; ппп = 7,12.

– клинкерная пыль, %: MgO = 1,49; Al₂O₃ = 4,11; SiO₂ = 16,89; K₂O = 1,57; CaO = 71,64; Fe₂O₃ = 4,30.

– аспирационная пыль, %: MgO = 0,97; Al₂O₃ = 4,68; SiO₂ = 20,31; K₂O = 6,43; CaO = 64,15; Fe₂O₃ = 3,47.

– песчаник, %: ZnO = 0,03; Al₂O₃ = 1,93; SiO₂ = 66,00; K₂O = 0,42; Na₂O = 1,26; CaO = 29,45; Fe₂O₃ = 0,58; TiO₂ = 0,32.

– известняк, %: MgO = 0,72; Al₂O₃ = 1,55; SiO₂ = 5,05; K₂O = 0,60; CaO = 90,14; Fe₂O₃ = 1,40; SO₃ = 0,49; ппп = 0,05.

– кварцевый песок, %: MgO = 6,32; Al₂O₃ = 14,99; SiO₂ = 73,83; K₂O = 1,83; CaO = 0,60; Fe₂O₃ = 0,97; SO₃ = 0,14; TiO₂ = 1,32.

Для приготовления тонкодисперсных порошков из исследуемых горных пород, крупнокусковые из них предварительно измельчали в щековой дробилке, а затем, как и мелкозернистые были подвергнуты тонкому измельчению в лабораторной роликовой мельнице. Через определённые промежутки времени из мельницы отбирались пробы для определения удельной поверхности (при помощи прибора ПСХ-12) и выявления зависимости степени дисперсности порошков от продолжительности измельчения (рисунк 1).

Результаты исследования и их анализ

Полученные зависимости удельной поверхности минеральных порошков от продолжительности тонкого помола позволили нам установить, что процесс измельчения довольно трудоемкий и определяется различными факторами. Конечно можно предполагать, что удельная поверхность будет возрастать в линейной пропорциональности с увеличением времени измельчения, но экспериментальные результаты доказывают, что степень дисперсности определяется природой исходных горных пород, если точнее природой породообразующих минералов, составляющих данные породы. Так минеральные порошки с повышенным содержанием в морфологическом составе кварца труднее подвержены помолу, о чем свидетельствуют сравнительно меньшие показатели удельной поверхности кварцевых песков и вулканического туфа. А более мягкие природные минералы, как кальцит, содержащиеся в известняке, песчанике и мергеле легко поддаются измельчению, соответственно удельная поверхность порошков высокая. Барханные пески отличаются

довольно высоким содержанием пылевидной фракции в виде глинистых примесей, поэтому мягкая алюмосиликатная составляющая способствует более усиленному повышению дисперсности. Также важно отметить, что увеличение продолжительности помола выше 60 минут не имеет явного смысла, так как 90 минутное измельчение, фактически не привело к росту удельной поверхности, а расход электроэнергии и технологического оборудования, безусловно, присутствует.

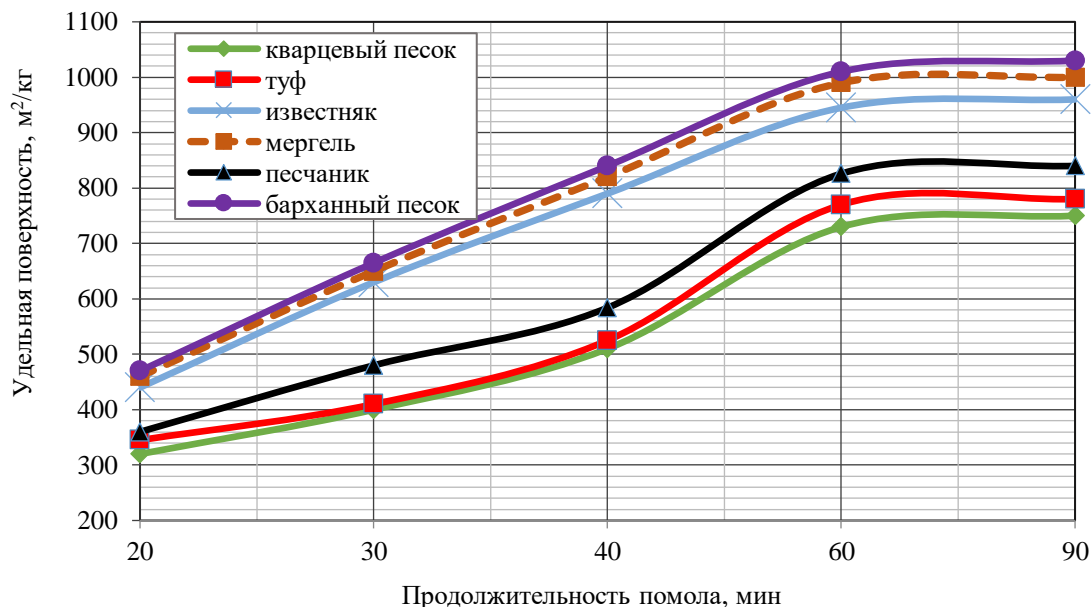


Рисунок 1 – График зависимости удельной поверхности минеральных порошков от продолжительности измельчения

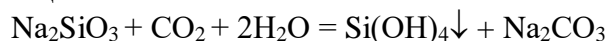
Окремненный мергель исследовался в двух видах, до термообработки в естественном виде, и после термоактивации при температуре 700 °С, исследования на растровом электронном микроскопе Quanta 3D 200 i показали следующий оксидный состав % по массе:

– окремненный мергель термообработанный при температуре 700 °С: CO₂ = 31,49; MgO = 0,41; Al₂O₃ = 2,20; SiO₂ = 28,53; Na₂O = 0,58; CaO = 35,92; Fe₂O₃ = 0,86.

Удельная поверхность термоактивированного мергеля практически не изменилась и составила $S_{уд} = 475 - 1050 \text{ м}^2/\text{кг}$ при продолжительности измельчения 20 – 90 минут, но химический и морфологический составы заметно изменились, о чем свидетельствуют проведенный микроанализ. Отходы цементного производства в виде пыли электрофильтров, которая была собрана двух видов: аспирационная и клинкерная, помолу не подлежала и исследовалась в естественном состоянии.

Для изучения влияния удельной поверхности минеральных составляющих на сроки схватывания вяжущей связки, были приготовлены образцы цементного теста с использованием исследуемых высокодисперсных порошков, затворенных тем расходом метасиликата натрия, соответствующим его нормальной консистенции. Сроки схватывания цементного теста щелочной затворения определяли на приборе Вика, в таблице 1 приводятся результаты испытаний.

Полученные результаты испытаний дают возможность понять сложность процесса твердения вяжущей системы «минеральный порошок – щелочной раствор Na₂SiO₃». Во всех предлагаемых системах большей реакционной активностью обладает щелочной затворитель, и именно благодаря ему происходит твердение вяжущей связки за счет контактирования с углекислотой воздуха по реакции:



За счет выпадения в осадок геля кремниевой кислоты и начинает твердение системы, поэтому в вяжущих связках, в которых процесс схватывания не удалось выявить, было обнаружено, что в процессе исследований на цементном тесте в кольце прибора Вика образовывалась плотная прослойка, которая уплотнялась с течением времени, препятствуя исследованиям. Такой характер вяжущей связки свойственен порошкам из известняка, песчаника, вулканического туфа кварцевой муки, окремненного мергеля и кварцевого и барханного песка, получается для ускорения процесса твердения и набора прочности в систему следует ввести катализаторы, иначе при нормальных условиях формирование структуры затягивается на длительный срок, да и вряд ли полученные композиты будут обладать гидравлической способностью.

Таблица 1 – Сроки схватывания щелочного цементного теста «минеральный порошок – Na_2SiO_3 »

№	Наименование минерального порошка	Начало / конец, час – мин.		
		Удельная поверхность, $S_{уд}$, $\text{м}^2/\text{кг}$		
		320	520	730
1	Вулканический туф	не нормируется		
2	Окремненный мергель	не нормируется		
3	Термоактивированный мергель 700 °С	<u>00-35</u> 00-46	<u>00-26</u> 00-32	<u>00-22</u> 00-29
4	Барханный песок	не нормируется		
5	Известняк	не нормируется		
6	Песчаник	не нормируется		
7	Кварцевый песок	не нормируется		
8	Аспирационная пыль, $S_{уд} = 210 \text{ м}^2/\text{кг}$	<u>00-16</u> 00-31		
9	Клинкерная пыль, $S_{уд} = 280 \text{ м}^2/\text{кг}$	<u>00-40</u> 01-20		

Но из исследуемых порошков были минеральные порошки, обладающие вяжущей способностью, способные самостоятельно без воздействия катализаторов и температуры схватываться, твердеть и превращаться в камень при нормальных условиях. К ним отнести можно минеральные порошки из термоактивированного при температуре 700 °С мергеля, аспирационной и клинкерной пылей электрофилтров.

Анализируя полученные данные в реакционно-активных порошках можно выявить зависимость между показателями удельной поверхности и сроками схватывания. С увеличением удельной поверхности наглядно укорачиваются сроки схватывания, что позволяет нам полагать, что процесс механоактивации способствует раскрытию внутреннего энергетического потенциала на поверхности зерен порошков, что и ускоряет растворимость активных составляющих системы.

Термоактивация мергеля благоприятно сказывается на морфологии материала, проведенные ранее исследования подтверждают образование кварца, плагиоклаза, гидрослюд, силикатов кальция типа ларнита $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ и окиси кальция. Сроки схватывания реально короткие начало 26 минут, конец 32 минуты при удельной поверхности термообработанного порошка $S_{уд} = 526 \text{ м}^2/\text{кг}$, поэтому в дальнейших исследованиях надо рассмотреть все возможные варианты по увеличению периода схватывания. Установлена в исследованиях реакционная способность термоактивированного мергеля в комплексе с щелочным раствором, но для подтверждения эффективности используемого технологического приема – термообработки, необходимо провести более глубокие исследования с этим материалом, в таблице 2 приводятся результаты испытаний.

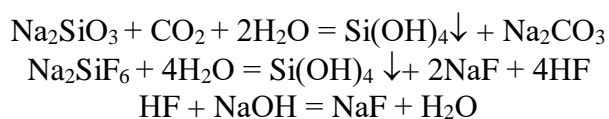
Анализируя полученные результаты исследования вяжущих связок «минеральный порошок – затворитель» с использованием окремненного мергеля в различных модификациях и способах затворения, можно констатировать, что термоактивация привела к образованию вяжущего материала, так как даже при добавлении воды происходит схватывание и твердение системы.

Таблица 2 –Свойства вяжущих систем на мергеле

№	Показатели качества	Термоактивированный мергель 700 °С, S _{уд} = 526 м²/кг		Мергель, S _{уд} = 526 м²/кг	
		вид затворителя			
		Na ₂ SiO ₃	H ₂ O	Na ₂ SiO ₃	Na ₂ SiO ₃ + Na ₂ SiF ₆
1	Нормальная густота щелочного цементного теста, %	56,5	40,0	52,5	52,0
2	Сроки схватывания, начало/ конц. час-мин.	<u>00-26</u> 00-32	<u>01-37</u> 06-29	схватывание не нормируется	<u>00-55</u> 01-47

Начало схватывания наступает своевременно, но конец затягивается, но в любом случае это доказывает реакционную способность полученного порошка, а сравнить свойства цементного камня получится только после проведения соответствующих испытаний. Не обожженный мергель даже в высокодисперсном состоянии при затворении жидким стеклом не схватывается и не твердеет в нормальных условиях, поэтому для определения его вяжущих свойств был использован ускоритель твердения кремнефтористый натрий Na₂SiF₆, который использовали в дозировке 6% от массы жидкого натриевого раствора Na₂SiO₃.

Механизм твердения системы в данном случае будет протекать по следующим реакциям:



Таким образом, использование кремнефтористого натрия ускоряет расщепление силикатов щелочного раствора, и выпадения в осадок геля кремниевой кислоты, а образуемый фторид натрия является малорастворимым соединением, все это в комплексе способствует твердению системы.

Полученные данные подтверждают эффективность данного бесклнкерного вяжущего щелочной активации, а схватывание термоактивированного мергеля при затворении водой, дает нам возможность использовать водный раствор жидкого натриевого стекла, или в перспективе получить альтернативу этому виду щелочного раствора. А если учитывать, что термоактивированный мергель также будет участвовать в реакциях взаимодействия с щелочным раствором, то можно ожидать весомых результатов и получать прочные и долговечные строительные композиты.

Особое внимание необходимо обратить, на отходы цементной промышленности в виде пыли электрофильтров (таблица 3), во-первых, это позволит решить экологический вопрос, так как на цементных заводах образуется большое количество аспирационной пыли, которая негодна для повторного возврата в производство и нуждается в вывозе в близлежащие территории, тем самым нанося огромный вред горному ландшафту.

Во-вторых, ее не надо домалывать, так как собранная с электрофильтров с S_{уд} = 210 м²/кг она является довольно реакционноспособной при активации щелочным раствором, начало схватывания составило 16 минут, а конец 31 минут. Цементное щелочное тесто было достаточно легкое и пластичное, удобообрабатываемое.

Для сравнения и выявления оптимальной композиции на основе аспирационной пыли, ее затворяли разными затворителя и использовали ускоритель твердения в одном случае.

Таблица 3 –Свойства вяжущих систем на отходе цементной промышленности

№	Показатели качества	Клинкерная пыль, S _{уд} = 280 м ² /кг		Аспирационная пыль, S _{уд} = 210 м ² /кг		
		вид затворителя				
		Na ₂ SiO ₃	H ₂ O	Na ₂ SiO ₃	H ₂ O	Na ₂ SiO ₃ + Na ₂ SiF ₆
1	Нормальная густота щелочного цементного теста, %	50,0	30,0	72,5	42,0	70,0
2	Сроки схватывания, начало/ конец, час-мин.	<u>00-40</u> 01-20	<u>00-54</u> 01-56	<u>00-16</u> 00-31	<u>06-08</u> 07-16	<u>00-24</u> 00-36

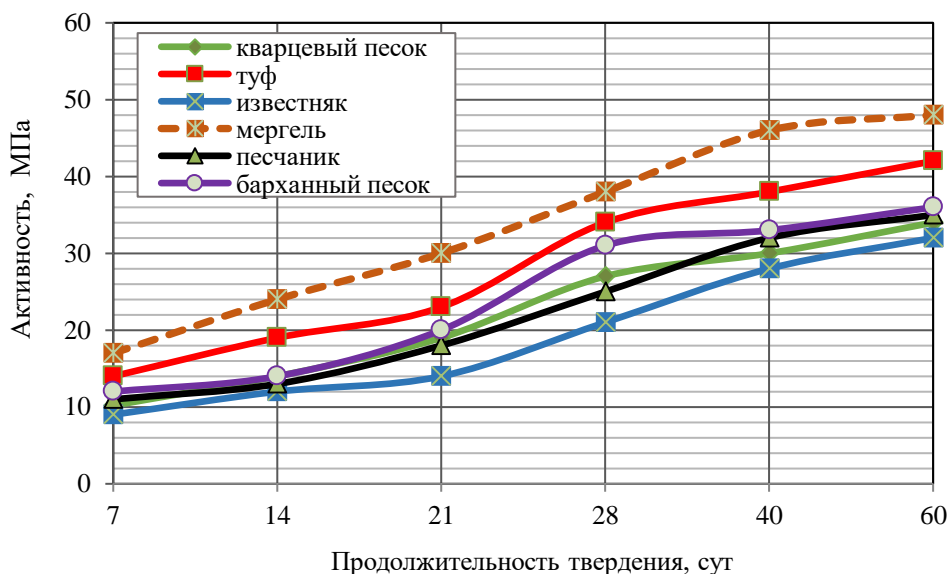
Так вот в композиции «аспирационная пыль – Na_2SiO_3 – Na_2SiF_6 » добавка-ускоритель проявила обратный эффект, наблюдался эффект ложного схватывания, что было ранее зафиксировано и в системе с барханным песком, начало схватывания замедлилось на 8 минут, это подтверждает, что основным вяжущим в данной системе является минеральный порошок. Аспирационная пыль при затворении водой проявила большое водоотделение в первые минуты исследования, схватывание наступило довольно поздно через 6 часов, получается, что она малоактивна в естественном виде и для активации данного порошка необходим щелочной раствор.

Клинкерная пыль электрофильтров совсем по-другому себя показала, при затворении с жидким стеклом потребовалось 50 % щелочного раствора для получения теста нормальной консистенции, а при затворении водой проявила водоотталкивающий эффект, и для получения теста нормальной густоты потребовалось 30 % воды, но при укладке смеси в кольцо началось интенсивное водоотделение, начало схватывания составило 54 минуты, конец 2 часа 3 минуты. Такое поведение клинкерной пыли электрофильтров обусловлено наличием пережога, так как перед испытанием навеску материала просеивали через сито №09, и остаток на сите составил 5 % стекловидных зерен от массы навески, и именно это снижает растворимость исследуемого порошка. Также важно отметить, что при затворении водой присутствует интенсивное высолообразование, что является результатом гидратации щелочных оксидов, находящихся в клинкерной пыли.

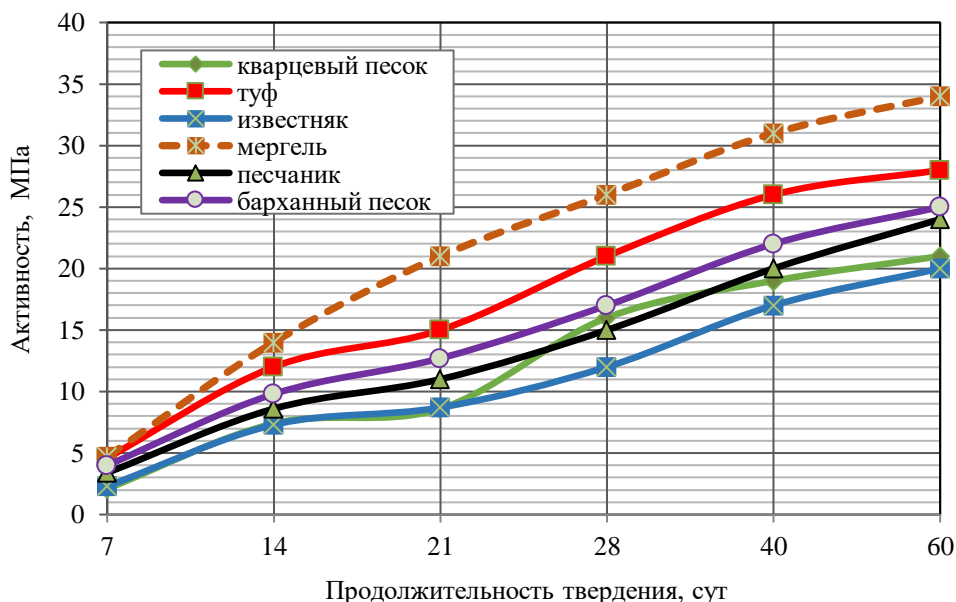
Как показали полученные результаты не все из исследуемых минеральных порошков в тонкодисперсном состоянии обладают вяжущими свойствами при активации щелочным раствором, но схватывание и твердение будет происходить в системе «минеральный порошок – Na_2SiO_3 – Na_2SiF_6 », при дозировке ускорителя твердения – кремнефтористого натрия 6 % от массы метасиликата натрия, с использованием порошков их вулканического туфа, известняка, песчаника, кварцевых и барханных песков.

Для получения многокомпонентных вяжущих систем «активный порошок – минеральный порошок – щелочной раствор» использовались все исследуемые минеральные порошки, а для выявления эффективной рецептуры данных связок, необходимо найти оптимальную концентрацию ее компонентов. Содержание добавки минеральных порошков (20 минутный помол) в данных композициях составило 20 %, клинкерная пыль добавлялась во всех вяжущих связках при дозировке 5 %. Для определения активности исследуемых композиций многокомпонентных наполненных связок были приготовлены образцы балочки размером 2х2х10 см, где в качестве активного порошка использовали аспирационную пыль электрофильтров и термоактивированный мергель, в качестве мелкого заполнителя использовался монофракционный Вольский песок с модулем крупности 2,5. Смесь минеральных порошков и заполнителя тщательно перемешивали и затворяли водным раствором жидкого натриевого стекла (силикатный модуль 2,8, плотность 1,42 кг/м³). На вторые сутки после распалубки образцы помещались в течение следующего периода хранения в сушильный шкаф при температуре 50°C на 2 часа, так как температура является катализатором твердения и набора прочности цементного камня. На рисунке 2 приводятся

результаты испытаний, кинетика набора прочности многокомпонентных систем «активный порошок – минеральный порошок – Na_2SiO_3 ».



а)



б)

Рисунок 2 – Кинетика набора прочности многокомпонентных систем: «термоактивированный мергель – минеральный порошок – Na_2SiO_3 » (а), «аспирационная пыль – минеральный порошок – Na_2SiO_3 » (б)

Полученные результаты испытаний показали, что образцы с использованием в качестве реакционной составляющей термоактивированного мергеля при температуре 700 °С характеризуются более высокой прочностью, в сравнении с образцами на аспирационной пыли электрофильтров. Тонкодисперсный порошок из мергеля в обоих вяжущих связках показал максимальный показатель активности 48 и 34 МПа, порошок из вулканического туфа также благоприятно влияет на прочность системы, активность составила 42 и 27 МПа. Можно констатировать, что именно алюмосиликатная природа, как активной составляющей, так и минерального порошка-наполнителя системы, все в комплексе повысило прочность вяжущих связей щелочной активации.

Выводы

Таким образом, полученные рецептуры вяжущих систем щелочной активации с использованием термоактивированного мергеля при температуре 700 °С и аспирационной пыли электрофильтров, позволят создавать строительные композиты с заданными свойствами, что даст возможность при необходимости заменить традиционный энерго- и ресурсоемкий портландцемент в менее ответственных технологических переделах строительства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш. Перспективы использования термоактивированного сырья алюмосиликатной природы // Приволжский научный журнал. 2018. №2 (Т.46). С. 65–70.
2. Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Mintsaeв M.Sh., Bisultanov R.G Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging (Мелкозернистые бетоны на основе вяжущих щелочной активации) Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol.1. P.500-503.
3. Bataev D.K-S., S- A. Yu. Murtazayev, Salamanova M.Sh., Viskhanov S.S. Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders (Использование цементной пыли в производстве бесклнкерных вяжущих щелочной активации) / Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol.1. P.457-460.
4. Nematollahi B., Sanjayan J. Efficacy of Available Superplasticizers on Geopolymers [Elec-tronic resource] // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2014. Vol. 7. №7. Pp.1278-1282. <http://www.maxwellsci.com/print/rjaset/v7-1278-1282.pdf>.
5. Hardjito D., Wallah S.E, Sumajouw D.M.J, Rangan B.V. Properties of geopolymer concrete with fly ash source material: effect of mixture composition / In: Seventh CANMET/ACI international conference on recent advances in concrete technology, Las Vegas, USA; 2002.
6. Alonso S., Palomo A. Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio // Materials Letters. 2001. №47(1-2). Pp.55-62.
7. Солдатов А.А., Сариев И.В., Жаров М.А., Абдураимова М.А. Строительные материалы на основе жидкого стекла // В сборнике: Актуальные проблемы строительства, транспорта, машиностроения и техносферной безопасности Материалы IV-й ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета. Н.И. Стоянов (ответственный редактор). 2016. С. 192-195.
8. Kozhukhova N.I., Chizhov R.V., Zhernovsky I.V., Strokova V.V. Structure formation of geopolymer perlite binder vs. Type of alkali activating agent // International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Vol. 8(3). Pp. 15338–15348.
9. Саламанова М.Ш., Муртазаев С.-А.Ю. Цементы щелочной активации: возможность снижения энергоемкости получения строительных композитов // Строительные материалы. 2019. № 7. С.32-41.
10. Obata A., Kasuga T., Jones J.R. Hydroxyapatite Coatings Incorporating Silicon Ion Releasing System on Titanium Prepared Using Water Glass and Vaterite // Journal of the American Ceramic Society. 2011. Vol. 94. Iss.7. P. 2074-2079.
11. Reinik J., Heinmaa I., Mikkola J.P., Kirso U. Hydrothermal alkaline treatment of oil shale ash for synthesis of tobermorites // Fuel. 2007. Vol. 86. P. 669-676.
12. Кривенко П.В., Скурчинская Ж.В., Сидоренко Ю.А. Шлакощелочные вяжущие нового поколения // Цемент. 1991. №11-12. С. 4-8.
13. Kmita A., Hutera B. The influence of physical and chemical parameters of modified water glass on the strength of loose self-setting sands with water-glass // Metallurgy and foundry engineering. 2012. Vol. 38. No.1. P. 67-71.
14. Рахимова Н.Р., Рахимов Р.З. Влияние дисперсности и гранулометрического состава молотых шлаков на свойства шлакощелочных вяжущих // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2008. Вып. 11. С. 16-18.
15. Удодов С.А., Черных В.Ф., Черный Д.В. Применение пористого заполнителя в отделочных составах для ячеистого бетона // Сухие строительные смеси. 2008. № 3. С.70.
16. Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Mintsaeв M.Sh., Bisultanov R.G Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging (Мелкозернистые бетоны на основе вяжущих щелочной активации) Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol.1. P.500-503.

17. Nesvetaev G., Koryanova Y., Zhilnikova T. On effect of superplasticizers and mineral additives on shrinkage of hardened cement paste and concrete // В сборнике: MATEC Web of Conferences 27. Сер. "27th R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP), TFOCE 2018" 2018. С. 04018.
18. Stelmakh S.A., Nazhnev M.P., Shcherban E.M., Yanovskaya A.V., Cherpakov A.V. Selection of the composition for centrifuged concrete, types of centrifuges and compaction modes of concrete mixtures // Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications (PHENMA 2018) Abstracts & Schedule. Edited by Yun-Hae Kim, I.A. Parinov, S.-H. Chang. 2018. С. 337.
19. Shuisky A., Stelmakh S., Shcherban E., Torlina E. Recipe-technological aspects of improving the properties of non-autoclaved aerated concrete // MATEC Web of Conferences Сер. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017" 2017. С. 05011.
20. Солдатов А.А., Сариев И.В., Жаров М.А., Абдураимова М.А. Строительные материалы на основе жидкого стекла // В сборнике: Актуальные проблемы строительства, транспорта, машиностроения и техносферной безопасности Материалы IV-й ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета. Н.И. Стоянов (ответственный редактор). 2016. С. 192-195.
21. Афонина М.И., Иванов С.В. Опыт и перспектива использования покрытий-заменителей снега в зимних рекреационных и спортивных комплексах // Экономика строительства и природопользования. 2016. № 1. С. 66-72.

REFERENCES

1. Murtazaev St. A.Yu., Salamanova M.Sh. Prospects for the use of thermally activated raw materials of aluminosilicate nature // Volga Scientific Journal. 2018. No. 2 (Т.46). S. 65–70.
2. Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Mintsaeв M.Sh., Bisultanov R.G Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging. / Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol.1. P.500-503.
3. Bataev D.K-S., S- A. Yu. Murtazayev, Salamanova M.Sh., Viskhanov S.S. Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders / Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol.1. P.457-460.
4. Nematollahi B., Sanjayan J. Efficacy of Available Superplasticizers on Geopolymers [Elec-tronic resource] // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2014. Vol. 7 №7. Pp.1278-1282. <http://www.maxwellsci.com/print/rjaset/v7-1278-1282.pdf>.
5. Hardjito D., Wallah S.E, Sumajouw D.M.J, Rangan B.V. Properties of geopolymer concrete with fly ash source material: effect of mixture composition / In: Seventh CANMET/ACI international conference on recent advances in concrete technology, Las Vegas, USA; 2002.
6. Alonso, S. Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio / S. Alonso, A. Palomo // Materials Letters. - 2001. - №47(1-2). - pp.55-62.
7. Soldatov A.A., Sariev I.V., Zharov M.A., Abduraimova M.A. Building materials based on liquid glass [Text] // In the collection: Actual problems of construction, transport, engineering and technosphere safety. Materials of the IVth annual scientific and practical conference of the North Caucasus Federal University. N.I. Stoyanov (executive editor). 2016. S. 192-195.
8. Kozhukhova N.I., Chizhov R.V., Zhernovsky I.V., Strokova V.V. Structure formation of geopolymer perlite binder vs. Type of alkali activating agent // International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Vol. 8(3). Pp. 15338–15348.
9. Salamanova M.Sh. Murtazaev St. A.Yu. Cements of alkaline activation: the possibility of reducing the energy intensity of obtaining building composites [Text] // Building materials. 2019. No. 7. P.32-41.
10. Obata A., Kasuga T., Jones J.R. Hydroxyapatite Coatings Incorporating Silicon Ion Releasing System on Titanium Prepared Using Water Glass and Vaterite // Journal of the American Ceramic Society. 2011. Vol. 94. Iss.7. P. 2074-2079.
11. Reinik J., Heinmaa I., Mikkola J.P., Kirso U. Hydrothermal alkaline treatment of oil shale ash for synthesis of tobermorites // Fuel. 2007. Vol. 86. P. 669-676.
12. Krivenko P.V., Skurchinskaya J.V., Sidorenko Yu.A. Slag-alkaline binders of a new generation // Cement. 1991. No. 11-12. S. 4-8.
13. Kmita A., Hutera B. The influence of physical and chemical parameters of modified water glass on the strength of loose self-setting sands with water-glass // Metallurgy and foundry engineering. 2012. Vol. 38. No. 1. P. 67-71.
14. Rakhimova, N.R., Rakhimov R.Z. The effect of dispersion and particle size distribution of ground slag on the properties of slag alkaline binders // Building materials, equipment, technologies of the XXI century. 2008. Issue. 11. S. 16-18.

15. Udodov S.A., Chernykh V.F., Cherny D.V. The use of porous aggregate in finishing compositions for aerated concrete // Dry building mixtures. 2008. No. 3. P.70.
16. Murtazayev S- A. Yu., Salamanova M.Sh., Mintsayev M.Sh., Bisultanov R.G Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging / Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol.1. P.500-503.
17. Nesvetaev G., Koryanova Y., Zhilnikova T On effect of superplasticizers and mineral additives on shrinkage of hardened cement paste and concrete //MATEC Web of Conferences 27. Сер. "27th R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP), TFoCE 2018" 2018. C. 04018.
18. Stelmakh S.A., Nazhnev M.P., Shcherban E.M., Yanovskaya A.V., Cherpakov A.V. Selection of the composition for centrifuged concrete, types of centrifuges and compaction modes of concrete mixtures // Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications (PHENMA 2018) Abstracts & Schedule. Edited by Yun-Hae Kim, I.A. Parinov, S.-H. Chang. 2018. C. 337.
19. Shuisky A., Stelmakh S., Shcherban E., Torlina E. Recipe-technological aspects of improving the properties of non-autoclaved aerated concrete // MATEC Web of Conferences Сер. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017" 2017. C. 05011.
20. Soldatov A.A., Sariev I.V., Zharov M.A., Abduraimova M.A. Building materials based on liquid glass // In the collection: Actual problems of construction, transport, engineering and technosphere safety Materials of the IVth annual scientific and practical conference of the North Caucasus Federal University. N.I. Stoyanov (executive editor). 2016. S. 192-195.
21. Afonina M.I., Ivanov S.V. Experience and prospect of using snow substitute coatings in winter recreational and sports complexes // Economics of Construction and Environmental Management. 2016. No. 1. S. 66-72.

Информация об авторах:

Муртазаев Сайд-Альви Юсупович

ФГБОУ ВО «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени акад. М.Д. Миллионщикова», г. Грозный, Россия,
Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова Российской академии наук, г. Грозный, Россия,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии строительного производства.
E-mail: s.murtazaev@mail.ru

Саламанова Мадина Шахидовна

ФГБОУ ВО «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени акад. М.Д. Миллионщикова», г. Грозный, Россия,
Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова Российской академии наук, г. Грозный, Россия,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии строительного производства.
E-mail: madina_salamanova@mail.ru

Information about authors:

Murtazaev S-A. Yu.

Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov, Grozny, Russia,
Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia,
doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Technology of Construction Production.
E-mail: s.murtazaev@mail.ru

Salamanova M. Sh.

Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov, Grozny, Russia,
Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia,
candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department of technology of building production.
E-mail: madina_salamanova@mail.ru

В.П. СЕЛЯЕВ¹, П.В. СЕЛЯЕВ¹, С.Ю. ГРЯЗНОВ¹, Д.Р. БАБУШКИНА¹
¹ФГБОУ ВО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия

ВЕРИФИКАЦИЯ ЗАВИСИМОСТЕЙ, АППРОКСИМИРУЮЩИХ ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНОВ ЦЕМЕНТНОГО И ПОЛИМЕРНОГО МЕТОДОМ НОРМИРУЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Аннотация. В статье проводится верификация некоторых аппроксимирующих степенных и гиперболических зависимостей между напряжениями σ и деформациями ε для экспериментальных диаграмм деформирования цементного бетона и полимернобетона.

При анализе состояния, остаточного ресурса железобетонных конструкций, приходится решать задачу определения зависимости между напряжениями и деформациями в различных расчетных сечениях конструкций. Традиционный подход, основанный на подборе аппроксимирующей функции « $\sigma - \varepsilon$ » по числовым значениям диаграммы деформирования, полученной путем испытания образцов (кубов, призм, цилиндров), практически не выполним. Поэтому предлагается альтернативный подход, основанный на подборе аппроксимирующей функции по нормируемым показателям: пределу прочности (σ_{bw}); модулю упругости (E_{b0}); предельной деформации (ε_{bw}). Числовые значения нормируемых показателей можно определить в заданной точке путем анализа результатов вдавливания индентора в материал конструкций. В качестве аппроксимирующих, рассмотрим степенные функции, которые наиболее предпочтительны для материалов с фрактальной структурой.

Рассмотрены различные граничные условия для определения постоянных коэффициентов α и β по системе нормируемых показателей. Проанализированы графики изменения касательных модулей.

Ключевые слова: напряжения, деформации, аппроксимация, секущий модуль, касательный модуль, диаграмма деформирования.

V.P. SELYAEV¹, P.V. SELYAEV¹, S.YU. GRYAZNOV¹, D.R. BABUSHKINA¹
¹Mordovia State University named after N.P. Ogarev, Saransk, Russia

VERIFICATION OF DEPENDENCES APPROXIMATING THE DIAGRAMS OF DEFORMATION OF CEMENT AND POLYMER CONCRETE BY THE METHOD OF NORMALIZED INDICATORS

Abstract The article verifies some approximating power-law and hyperbolic dependences between stresses σ and deformations ε for experimental deformation diagrams of cement concrete and polymer concrete.

When analyzing the state and residual life of reinforced concrete structures, one has to solve the problem of determining the relationship between stresses and deformations in various design sections of structures. The traditional approach, based on the selection of the approximating function " $\sigma - \varepsilon$ " from the numerical values of the deformation diagram obtained by testing samples (cubes, prisms, cylinders), is practically impossible. Therefore, an alternative approach is proposed based on the selection of an approximating function according to standardized indicators: ultimate strength (σ_{bw}); modulus of elasticity (E_{b0}); ultimate deformation (ε_{bw}). The numerical values of the normalized indicators can be determined at a given point by analyzing the results of indentation of the indenter into the material of structures. As approximating ones, consider the power functions that are most preferable for materials with a fractal structure.

Various boundary conditions are considered for determining the constant coefficients α and β according to the system of normalized indicators. The graphs of changes in tangent modules are analyzed.

Keywords: stresses, strains, approximation, secant modulus, tangent modulus, deformation diagram.

Введение

Современные тенденции развития методов расчета строительных конструкций направлены на создание новых схем и моделей, наиболее полно отражающих условия работы и свойства материала. Особое внимание следует уделить исследованию влияния физической нелинейности материала на надежность конструкции в процессе эксплуатации. Предложено несколько десятков функций, описывающих зависимость между напряжениями и деформациями при сжатии или растяжении бетона [1-3]. В основу их верификации заложены принципы соответствия числовых значений диаграмм деформирования, полученных экспериментально, и с помощью аппроксимации.

Точность аппроксимации можно увеличить до ста процентов, но какой в этом смысл? Известно, что диаграммы деформирования, полученные путем испытания контрольных образцов, не будут одинаковыми, и тем более они будут значительно отличаться от диаграмм деформирования бетона конструкции.

Поэтому в предлагаемой работе поставлена задача, разработать метод подбора аппроксимирующей функции, основанный на применении нормируемых показателей бетона: R_{bu} – прочность при сжатии; E_{b0} – модуль упругости; ε_{bu} – предельная деформация; ν_{bu} – предельный коэффициент упругости.

Нормируемые показатели можно определить неразрушающими методами в любой заданной точке конструкции путем вдавливания индентора в материал [4-6]. Это дает возможность описать диаграммы деформирования бетона в любой момент времени с учетом реальных условий эксплуатации.

Для аппроксимации диаграмм деформирования бетона предлагаем отдать предпочтение степенным функциям, так как структура бетона неоднородна и многофазна, но она соответствует принципам фрактальной геометрии: многомасштабности; самоподобия. По мнению Б. Мандельброта [7] и В.К. Балханова [8] свойства фрактальных систем должны описываться степенными функциями.

Результаты исследования и их анализ

Рассмотрим задачу аппроксимации экспериментальных диаграмм деформирования степенными и гиперболическими функциями (таблица 1) при сжатии цементного бетона и полимербетона. Экспериментальные данные для полимербетона при скорости нагружения 700 МПа/мин представлены в таблице 2. Предел упругого сопротивления и предел упругой относительной деформации соответственно равны: $R_{b,sup} = 82,62$ МПа; $\varepsilon_{ue} = 0,002875$. Для цементного бетона экспериментальные данные [9, 10] с начальным модулем упругости $E_b = 2,1 \cdot 10^4$ МПа и предельными относительными деформациями $\varepsilon_{bu} = 0,002$, представлены в таблице 3.

Таблица 1 – Некоторые функции аппроксимации диаграмм деформирования бетона при кратковременном нагружении

№ п/п	Вид функциональной зависимости « $\sigma - \varepsilon$ »	Математическое представление $\sigma = f(\varepsilon)$	Касательный модуль $E_k = d\sigma/d\varepsilon$
1	Степенные		
1.1	Зависимость Ф.И. Герстнера	$\sigma_i = \alpha \varepsilon_i - \beta \varepsilon_i^2$	$\alpha - 2\beta \varepsilon$
1.2	Зависимость А.Р. Ржаницына, П.А. Лукаша	$\sigma_i = \alpha \varepsilon_i - \beta \varepsilon_i^3$	$\alpha - 3\beta \varepsilon^2$
1.3	Комбинированная степенная зависимость при $n = 5$	$\sigma_i = \alpha \varepsilon_i - \beta \varepsilon_i^5$	$\alpha - 5\beta \varepsilon^4$
2	Гиперболические		
2.1	Зависимость С.П. Тимошенко	$\sigma_i = \frac{\varepsilon_i}{\alpha + \beta \varepsilon_i}$	$\frac{\alpha}{(\alpha + \beta \varepsilon)^2}$
2.2	Зависимость В.В. Соколовского	$\sigma_i = \frac{\alpha \varepsilon_i}{\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon_i}{\beta}\right)^2}}$	$\frac{\alpha}{\left(1 + \left(\frac{\varepsilon}{\beta}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}$

Таблица 2 – Экспериментальные данные для полимербетона [11]

№ п/п	$\varepsilon_{i,п.б.} \times 10^3$	$\sigma_{i,п.б.}, \text{ МПа}$
1	0,000	0,000
2	0,500	15,662
3	1,000	29,444
4	1,500	43,853
5	2,000	59,515
6	2,500	73,297
7	3,000	84,574
8	3,500	95,850
9	4,000	102,115
10	4,500	104,621
11	5,000	106,500

Таблица 3 – Экспериментальные данные для цементного бетона [9]

№ п/п	$\varepsilon_{i,ц.б.} \times 10^3$	$\sigma_{i,ц.б.}, \text{ МПа}$
1	0,000	0,000
2	0,250	4,977
3	0,500	8,805
4	0,750	12,059
5	1,000	14,930
6	1,250	17,610
7	1,500	19,715
8	1,750	20,863
9	2,000	21,323

В общем случае аппроксимирующую зависимость между напряжениями и деформациями бетона при сжатии будем определять из условия соответствия функций следующим предельным (нормируемым) показателям (рисунок 1) [12]:

1. при $\varepsilon_b \rightarrow 0$ первая производная (тангенс угла наклона касательной к кривой) $E_k = \text{tg} \beta = d\sigma_i/d\varepsilon_i$ должна быть равна начальному модулю упругости бетона E_b (определяем коэффициент α);
2. при $\varepsilon_b \rightarrow \varepsilon_{bu}$ касательный модуль $E_k = 0$ (определяем первое значение коэффициента β);
3. при определенном значении $\varepsilon_b = \varepsilon_{bu}$ напряжение бетона принимает максимальное значение R_b (определяем второе значение коэффициента β).

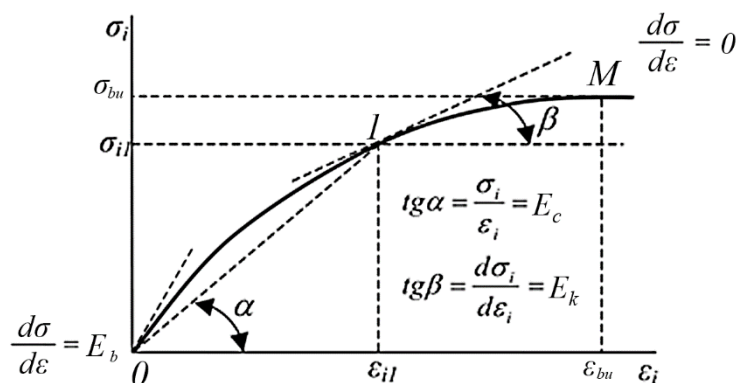


Рисунок 1 – Нормируемые показатели, которым должна отвечать функция $\sigma = f(\varepsilon)$

В качестве примера, определим постоянные коэффициенты α и β для зависимости Ф.И. Герстнера

$$\sigma = \alpha \varepsilon - \beta \varepsilon^2 ; E_k = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \alpha - 2\beta \varepsilon .$$

1. При $\varepsilon_b \rightarrow 0$:

$$\alpha = E_k = E_b ,$$

где E_b – начальный модуль упругости бетона.

2. При $\varepsilon_b \rightarrow \varepsilon_{bu}$

$$E_k = d\sigma/d\varepsilon = 0 ,$$

следовательно

$$E_b - 2\beta \varepsilon = 0 ,$$

откуда первое значение коэффициента β равно

$$\beta_1 = \frac{E_b}{2\varepsilon_{bu}} .$$

3. При $\varepsilon_b = \varepsilon_{bu}$ ($\sigma_b = \sigma_{bu}$)

$$\sigma_{bu} = \alpha \varepsilon_{bu} - \beta \varepsilon_{bu}^2 ,$$

откуда первое значение коэффициента β равно

$$\beta_2 = \frac{E_b - E_{bu}}{\varepsilon_{bu}} .$$

Значения коэффициентов α и β для остальных зависимостей были определены подобным образом и представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Формулы для определения постоянных коэффициентов α и β

№ п/п	Вид функциональной зависимости «σ – ε»	Коэффициенты		
		α	β	
		граничные условия		
		$\varepsilon_b \rightarrow 0$	$\varepsilon_b \rightarrow \varepsilon_{bu}$	$\varepsilon_b = \varepsilon_{bu}$
1	Степенные			
1.1	Зависимость Ф.И. Герстнера	E_b	$\frac{E_b}{2\varepsilon_{bu}}$	$\frac{E_b - E_{bu}}{\varepsilon_{bu}}$
1.2	Зависимость А.Р. Ржаницына, П.А. Лукаша	E_b	$\frac{E_b}{3\varepsilon_{bu}^2}$	$\frac{E_b - E_{bu}}{\varepsilon_{bu}^2}$
1.3	Комбинированная степенная зависимость при n = 5	E_b	$\frac{E_b}{5\varepsilon_{bu}^4}$	$\frac{E_b - E_{bu}}{\varepsilon_{bu}^4}$
2	Гиперболические			
2.1	Зависимость С.П. Тимошенко	$\frac{1}{E_b}$	$\frac{1}{\sigma_{bu}}$	$\frac{1}{\sigma_{bu}} - \frac{1}{E_b \cdot \varepsilon_{bu}}$
2.2	Зависимость В.В. Соколовского	E_b	$\frac{\sigma_{bu}}{E_b}$	$\sqrt{\frac{\varepsilon_{bu}^2 \cdot \sigma_{bu}^2}{E_b^2 \cdot \varepsilon_{bu}^2 - \sigma_{bu}^2}}$

Используя вычисленные (по двум видам граничных условий) постоянные коэффициенты α и β , представим графическую интерпретацию выбранных аппроксимирующих функций на рисунках 2 и 3, и проследим отклонение теоретических зависимостей $\sigma_i - \varepsilon_i$ от экспериментальных данных.

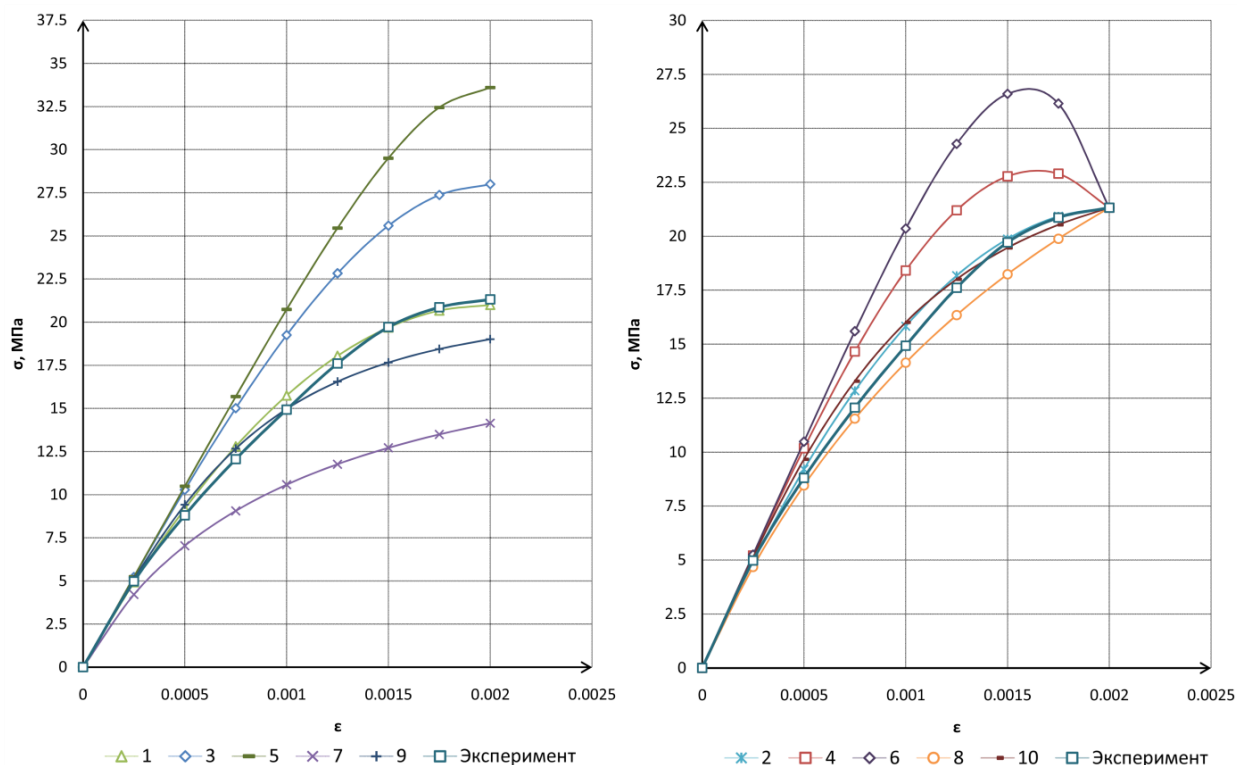


Рисунок 2 – Отклонение теоретических зависимостей $\sigma_i - \epsilon_i$ от экспериментальной кривой для цементного бетона (слева коэффициент $\beta = \beta_1$, справа – $\beta = \beta_2$):

1, 2 – зависимость Ф.И. Герстнера; 3, 4 – зависимость А.Р. Ржаницына, П.А. Лукаша;
5, 6 – комбинированная степенная зависимость при $n = 5$; 7, 8 – зависимость С.П. Тимошенко;
9, 10 – зависимость В.В. Соколовского

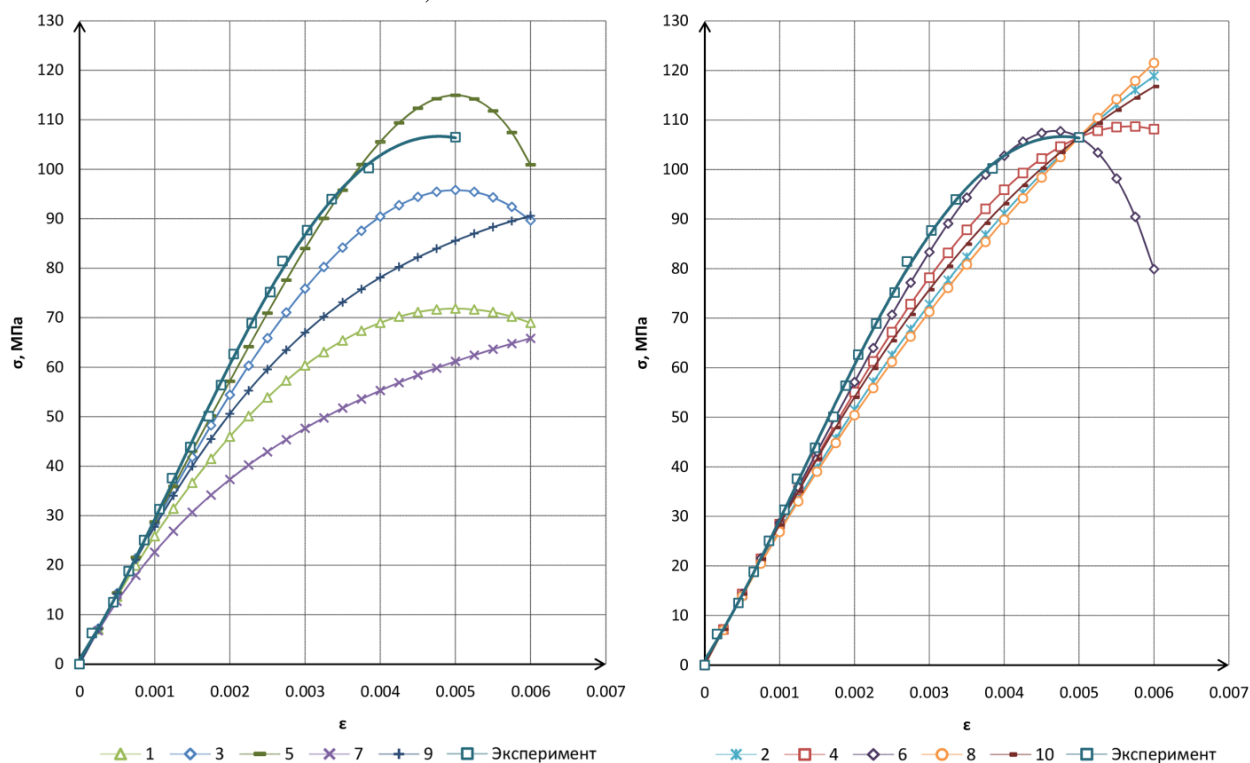


Рисунок 3 – Отклонение теоретических зависимостей $\sigma_i - \epsilon_i$ от экспериментальной кривой для полимербетона (слева коэффициент $\beta = \beta_1$, справа – $\beta = \beta_2$):

1, 2 – зависимость Ф.И. Герстнера; 3, 4 – зависимость А.Р. Ржаницына, П.А. Лукаша;
5, 6 – комбинированная степенная зависимость при $n = 5$; 7, 8 – зависимость С.П. Тимошенко;
9, 10 – зависимость В.В. Соколовского

Из анализа графиков, представленных на рисунке 2 можно сделать вывод, что более точно аппроксимирует экспериментальную диаграмму деформирования цементного бетона степенная зависимость Ф.И. Герстнера при $\beta = \beta_1$, среднее отклонение теоретической кривой от экспериментальной составляет – 2,46%. Остальные зависимости при данных условиях дают чрезмерно большие погрешности.

При $\beta = \beta_2$ достаточно точно описывают экспериментальные данные зависимость Ф.И. Герстнера (отклонение 2,48%) и гиперболическая зависимость В.В. Соколовского (отклонение 3,96%). Экстремумы зависимости А.Р. Ржаницына, П.А. Лукаша и комбинированной степенной зависимости 5-ой степени существенно превышают предельное сопротивление выбранного материала, что не соответствует действительности. Зависимость С.П. Тимошенко подобна с экспериментальной кривой, однако на участке $\varepsilon < \varepsilon_{bu}$ имеет большие отклонения – 4,58%.

Согласно результатам расчетов, представленных на рисунке 3 можно сделать вывод, что более точно аппроксимирует экспериментальную диаграмму деформирования полимербетона комбинированная степенная зависимость 5-ой степени при $\beta = \beta_2$, среднее отклонение теоретической кривой от экспериментальной составляет – 2,52%. Остальные зависимости при данных условиях и при условии $\beta = \beta_1$ дают чрезмерно большие погрешности.

При $\beta = \beta_2$ все зависимости достаточно близко располагаются с экспериментальной кривой и имеют общую точку при $\varepsilon = 0,005$. Однако после нее некоторые функции имеют восходящую зависимость, что не отвечает действительности.

На основании вышеизложенного можно сделать следующий вывод. Для аппроксимации экспериментальной кривой деформирования цементного бетона больше отвечает действительности зависимость Герстнера при $\beta = \beta_1$, а для полимербетона – комбинированная степенная зависимость при $n = 5$ при $\beta = \beta_2$.

Первая производная аналитической функции, связывающей напряжения и деформации является не чем иным, как касательным модулем, анализ изменения которого позволяет оценить степень соответствия теоретической зависимости физическим представлениям [11].

Для данного анализа вычислим значения касательных модулей для выбранных материалов, с учетом вычисленных ранее коэффициентов α и β (таблица 3 и 4) и отобразим графически на рисунках 4 и 5.

На графиках прослеживается, что некоторые функции касательного модуля имеют недостаток, который заключается в том, что они монотонно убывают вплоть до пересечения с горизонтальной осью координат, тогда как в первоначальный момент времени касательный модуль должен сохранять постоянное значение [11]. Если говорить о зависимости Герстнера, которая наиболее близко расположена к экспериментальной кривой деформирования, для цементного бетона, то следует отметить, что функция изменения касательного модуля имеет практически линейный вид, поэтому данную зависимость следует исключить, как не отражающую действительную работу материала под нагрузкой.

Наиболее точно из выбранных функций физическую сущность работы и цементного бетона, и полимербетона отражает уравнение комбинированной степенной зависимости при $n = 5$. Рассматривая зависимость касательного модуля этой функции, видно, что кривая сначала имеет постоянное значение, а затем постепенно убывает, и принимает нулевое значение при $\varepsilon \approx 0,005$.

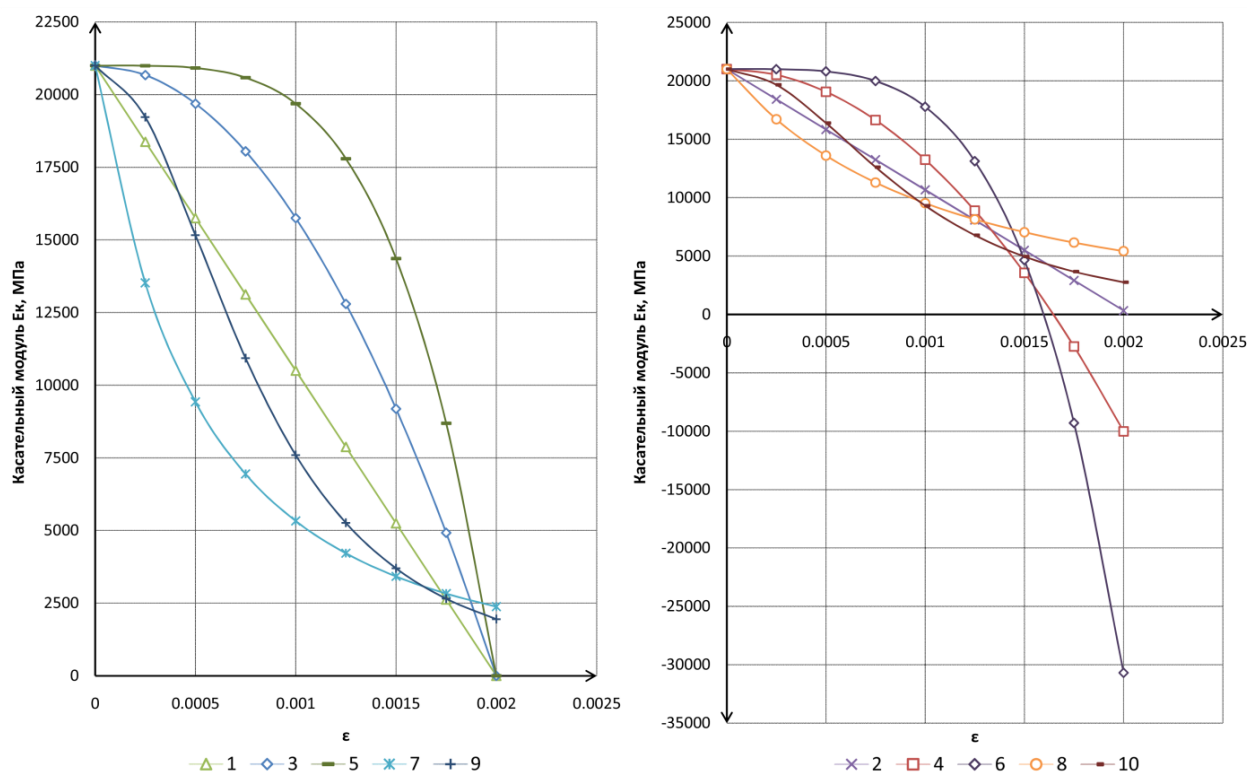


Рисунок 4 – Зависимость касательного модуля упругости от деформаций для цементного бетона (слева коэффициент $\beta = \beta_1$, справа – $\beta = \beta_2$):

1, 2 – зависимость Ф.И. Герстнера; 3, 4 – зависимость А.Р. Ржаницына, П.А. Лукаша;
5, 6 – комбинированная степенная зависимость при $n = 5$; 7, 8 – зависимость С.П. Тимошенко;
9, 10 – зависимость В.В. Соколовского

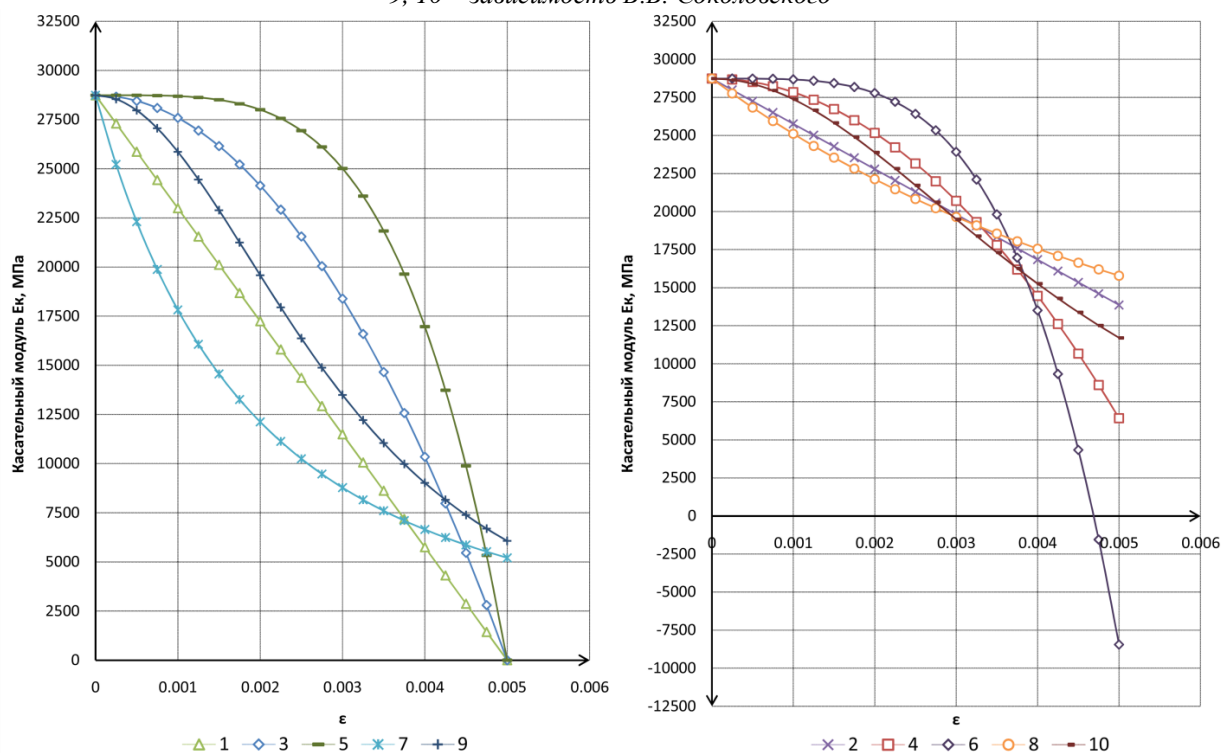


Рисунок 5 – Зависимость касательного модуля упругости от деформаций для полимербетона (слева коэффициент $\beta = \beta_1$, справа – $\beta = \beta_2$):

1, 2 – зависимость Ф.И. Герстнера; 3, 4 – зависимость А.Р. Ржаницына, П.А. Лукаша;
5, 6 – комбинированная степенная зависимость при $n = 5$; 7, 8 – зависимость С.П. Тимошенко;
9, 10 – зависимость В.В. Соколовского

Выводы

1. Для аналитического описания диаграмм сжатия и растяжения бетона в связи с развитием расчетных методов предлагалось много различных уравнений, основанных на степенной зависимости, параболических и гиперболических законах. Основной задачей которых является описать кривую лишь наглядно.

2. Аналитическая связь между напряжениями и деформациями сжатого бетона, построенная с учетом нормируемых показателей, позволяет во многих случаях получать наиболее достоверные сведения о несущей способности конструкций и при этом отказаться от дополнительных эмпирических зависимостей и коэффициентов.

3. Дальнейшее изучение различных способов аппроксимации экспериментальных диаграмм деформирования и нахождение определенных зависимостей теории и практики позволит создать базы данных, которые с достаточной точностью позволят определять различные параметры материалов, основываясь лишь на значениях секущего и касательного модулей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукаш П.А. Основы нелинейной строительной механики. Москва: Стройиздат, 1978. 202 с.
2. Ржаницын А.Р. Строительная механика: учеб. пособие для вузов. Москва: Высш. шк., 1982. 400 с.
3. Мурашкин Г.В., Мурашкин В.Г. Моделирование диаграммы деформирования бетона // Известия Орловского государственного технического ун-та. Сер. Строительство. 2007. № 3 (15). С. 86-88.
4. Селяев В.П., Селяев П.В., Сорокин Е.В., Алимов М.Ф. Влияние вида функциональной зависимости « $\sigma - \epsilon$ » на расчетные прогибы пластины // Региональная архитектура и строительство. 2018. № 2 (35). С. 17-25.
5. Селяев В.П., Селяев П.В. Физико-химические основы механики разрушения цементных композитов: монография. Саранск: Издательство Мордовского ун-та, 2018. 220 с.
6. Селяев В.П., Селяев П.В., Горенков А.О., Безрукова Е.С. Аналитическое описание диаграмм деформирования бетонов при сжатии // Региональная архитектура и строительство. 2020. № 3. С. 22-30.
7. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. Москва: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
8. Балханов В.К. Основы фрактальной геометрии и фрактального исчисления. Улан-Удэ: Бурятский гос. ун-т, 2013. 224 с.
9. Петров В.В., Кривошеин И.В. Методы расчета конструкций из нелинейной-деформируемого материала. Москва: АСВ, 2008. 208 с.
10. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. Москва: Стройиздат, 1996. 413 с.
11. Чебаненко А.И. Армополимербетонные строительные конструкции. Москва: Стройиздат, 1988. 440 с.
12. Байков В.Н., Горбатов С.В., Дмитриев З.А. Построение зависимости между напряжениями и деформациями сжатого бетона по системе нормируемых показателей // Известия вузов. Серия: Строительство и архитектура. 1997. № 10. С. 4-6.

REFERENCES

1. Lukash P.A. Osnovy nelineynoy stroitel'noy mekhaniki [Fundamentals of Nonlinear Structural Mechanics]. Moscow: Stroyizdat. 1978. 202 p. (rus)
2. Rzhantsyn A.R. Stroitel'naya mekhanika: ucheb. posobiye dlya vuzov [Structural mechanics: textbook. textbook for universities]. Moscow: Vysshaya shkola. 1982. 400 p. (rus)
3. Murashkin G.V., Murashkin V.G. Modelirovaniye diagrammy deformirovaniya betona [Simulation of the concrete deformation diagram]. *Izvestia of the Oryol State Technical University. Construction series. Transport*. 2007. Vol. 15. No. 3. Pp. 86-88. (rus)
4. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Sorokin Ye.V., Alimov M.F. Vliyaniye vida funktsional'noy zavisimosti « $\sigma - \epsilon$ » na raschetnyye progiby plastiny [Influence of the type of functional dependence " $\sigma - \epsilon$ " on the calculated deflections of the plate]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo*. 2018. Vol. 35. No. 2. Pp. 17-25. (rus)
5. Selyaev V.P., Selyaev P.V. Fiziko-khimicheskiye osnovy mekhaniki razrusheniya tsementnykh kompozitov: monografiya [Physicochemical foundations of fracture mechanics of cement composites: monograph]. Saransk: Publishing House of the Mordovian University, 2018. 220 p. (rus)

6. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Gorenkov A.O., Bezrukova E.S. Analiticheskoye opisaniye diagramm deformirovaniya betonov pri szhatii [Analytical description of concrete deformation diagrams in compression]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo*. 2020. No. 3. Pp. 22-30. (rus)
7. Mandelbrot B. Fraktal'naya geometriya prirody [The Fractal Geometry of Nature]. Moscow: Institute for computer research, 2002. 656 p. (rus)
8. Balkhanov V. K. Osnovy fraktal'noĭ geometrii i fraktal'nogo ischisleniia [Fundamentals of fractal geometry and fractal calculus]. Ulan-Ude: Buryat State Univ., 2013. 224 p. (rus)
9. Petrov V.V., Krivoshein I.V. Metody raschëta konstruktsii iz nelineĭno-deformiruemogo materiala [Methods for calculating structures made of nonlinearly deformable material]. Moscow: ASB, 2008. 208 p. (rus)
10. Karpenko N.I. Obshchiye modeli mekhaniki zhelezobetona [General models of reinforced concrete mechanics]. Moscow: Stroyizdat. 1996. 413 p. (rus)
11. Chebanenko A.I. Armopolimerbetonnye stroitel'nye konstruktsii [Armopolymer concrete building structures]. Moscow: Stroyizdat. 1988. 440 p. (rus)
12. Baĭkov V.N., Gorbatov S.V., Dmitrov Z.A. Postroenie zavisimosti mezhdu napriazheniiami i deformatsiiami szhatogo betona po sisteme normiruemykh pokazatelei [Building the relationship between stresses and deformations of compressed concrete according to the system of standardized indicators]. *Proceedings of universities. Series: Construction and architecture*. 1997. No. 10. Pp. 4-6. (rus)

Информация об авторах:

Селяев Владимир Павлович

ФГБОУ ВО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия,
Академик РААСН, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Строительные конструкции».
E-mail: ntorm80@mail.ru

Селяев Павел Владимирович

ФГБОУ ВО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции».
E-mail: ntorm80@mail.ru

Грязнов Сергей Юрьевич

ФГБОУ ВО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия,
аспирант кафедры «Строительные конструкции».
E-mail: sergey.gryaznov.97@mail.ru

Бабушкина Дельмира Рафиковна

ФГБОУ ВО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия,
инженер.
E-mail: delmira2009@yandex.ru

Information about authors:

Selyaev Vladimir P.

Mordovia State University named after N.P. Ogarev, Saransk, Russia,
Academician of RAACS, doctor of technical science, head professor of the department "Building construction".
E-mail: ntorm80@mail.ru

Selyaev Pavel V.

Mordovia State University named after N.P. Ogarev, Saransk, Russia,
candidate of technical science, docent of the department "Building construction".
E-mail: ntorm80@mail.ru

Gryaznov Sergey Yu.

Mordovia State University named after N.P. Ogarev, Saransk, Russia,
postgraduate student of the department "Building construction".
E-mail: sergey.gryaznov.97@mail.ru

Babushkina Delmira R.

Mordovia State University named after N.P. Ogarev, Saransk, Russia,
engineer.
E-mail: delmira2009@yandex.ru

А.А. СТЕПАНЕНКО¹

¹АОЧУ ВО «Московский финансово-юридический университет» МФЮА, г. Москва, Россия

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМЫ UP DOWN ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ МОСКВЫ: РОССИЙСКИЙ ОПЫТ

Аннотация. В статье рассмотрена разработанная модель экономики замкнутого цикла, в которой наряду с экономическими параметрами учитываются загрязнение и расход строительных материалов, пригодных для вторичной переработки. Модель отражает идею о том, что экономический рост общества сам по себе не может поддерживать или улучшать существующее качество окружающей среды, для этого необходимо увеличить коэффициент рециклинга. Цель исследования раскрыть факторы, влияющие на повышение уровня строительного рециклинга при внедрении эффективных и экологически безопасных систем управления строительными отходами в мегаполисах. Результаты исследования будут влиять на повышение качества и стандартов жизни населения города, создание благоприятных условий для безопасной, здоровой и благополучной жизни людей при обеспечении экономического роста города. Отражен процесс управления растущим объемом строительных отходов, подчеркнут рециклинг.

Ключевые слова: рециклинг строительных отходов, экономики замкнутого цикла.

A.A. STEPANENKO¹

¹AOCHU VO «Moscow University of Financial and Law» MFLA, Moscow, Russia

RESTRUCTURING IN RESIDENTIAL AREAS AND TRANSFORMATION OF THE URBAN SPACE OF THE METROPOLIS

Abstract. The article considers the developed model of the closed-cycle economy, which, along with economic parameters, takes into account pollution and consumption of building materials suitable for recycling. The model reflects the idea that the economic growth of a society alone cannot maintain or improve the existing quality of the environment, and for this it is necessary to increase the recycling rate. The purpose of the study is to reveal the factors influencing the increase in the level of recycling when introducing efficient and environmentally friendly systems for managing construction waste in megacities. The results of the study will affect the improvement of the quality and standards of life of the city population, the creation of favorable conditions for a safe, healthy and the prosperous life of people while ensuring the economic growth of the city. The process of the managing the growing volume of construction waste is reflected, recycling is emphasized.

Keywords: recycling of construction waste, circular economy.

Введение

Рост экономической активности и потребления сырья в течение последнего столетия привел к зависимости от импорта материалов и энергии во многих регионах России. Следствием возросшей материальности потребления человеком является резкое увеличение количества образующихся строительных отходов, с которыми необходимо надлежащим образом обращаться. Если рассматривать только регионы России, то в 2018 году на душу населения ежегодно образуется в среднем более 1,8 т отходов (без учета минеральных отходов), 27% из которых составляют строительные отходы. Политика создания циклов

рециклинга строительных отходов в рамках федерального и регионального законодательства снова оказалась верным путем. «Проблема зависимости материалов от импорта может решена за счет рекуперации отходов» - это подчеркивается в Послании к Федеральному Собранию Президента Российской Федерации В.В. Путина.

Государственная политика по обращению с отходами, в том числе со строительными отходами направлена на снижение воздействия обращения с отходами на здоровье и окружающую среду, а также на повышение эффективности использования ресурсов различных регионов Российской Федерации.

Правовую основу системы обращения со строительными отходами составляют: Федеральный закон «О стратегическом планировании в Российской Федерации» от 28.06.2014 № 172-ФЗ; Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» от 24.06.1998 № 89-ФЗ; Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 № 7-ФЗ; Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ; Указ Президента Российской Федерации от 19.04.2017 № 176 «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года»; Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах Российской Федерации на период до 2024 года»; Стратегия развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 10.05.2016 № 868-р; Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 25.01.2018 № 84-р; Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года, утвержденный Правительством Российской Федерации от 03.01.2014, нормативные акты субъектов Российской Федерации.

Обращаясь с Посланием к Федеральному Собранию в январе 2020 года, Президент Российской Федерации Владимир Путин отметил, что «нужно кардинально снизить объём отходов, поступающих на полигоны, внедрять отдельный сбор мусора, в целом переходить на экономику замкнутого цикла и уже с 2021 года начать применение механизма так называемой расширенной ответственности производителей, когда производители и импортёры товаров и упаковок несут расходы по их утилизации».

Модели и методы.

По мнению автора, целесообразно рассмотреть концепцию «замыкающего цикла» жизненного цикла строительных материалов и мер, которые охватывают весь жизненный цикл, от производства и использования до управления строительными отходами и их окончательное удаление на рынок для рекуперированных ресурсов и восстановления. «Замыкание цикла» между окончанием срока службы продукта и его производством обеспечивает возможность обращения ресурсов, материалов и продуктов и сохраняет их материальную, энергетическую и экономическую ценность в пределах экономики как можно дольше.

В пакете циркулярной экономики особое внимание уделяется замыканию петли на материальной стороне. В рамках модели экономики замкнутого цикла, наряду с экономическими параметрами необходимо учитывать расход материалов, пригодных для вторичной переработки. Модель заключает, что экономический рост сам по себе не может поддерживать или улучшать существующее качество продукции, для этого необходимо увеличить коэффициент рециклинга.

Повышение уровня строительного рециклинга является основной целью внедрения эффективных и экологически безопасных систем управления отходами. С экологической точки зрения, переработка строительных отходов должна снижать воздействие на окружающую среду. Возможности строительного рециклинга отходов во многом зависят от пригодности товаров к вторичной переработке и определения того, что следует понимать как

«рециркулируемые». В более общем плане определение взаимосвязи между отходами и сферой продукции является центральным элементом в оперативном осуществлении управления отходами в различных законодательных актах.

Результаты исследования и их анализ.

Таким образом, обязательные стандарты в отношении возможности вторичной переработки строительных отходов и четкие определения в отношении вторичной переработки становятся еще более важными, когда определяются количественные цели вторичной переработки.

Переработка отходов включает вторичные ресурсы - материалы, которые перестали считаться отходами, и попали в сферу производства. Переход от отходов к продукту может происходить в рамках процесса, в который вторичный материал входит в качестве входных отходов. После рекуперации строительные отходы должны соответствовать выработанным критериям и нижеперечисленным условиям:

- вторичное строительное сырье необходимо использовать под определенные цели;
- расширяется спрос вторичного сырья на рынке;
- производство вторичного сырья соответствует техническим требованиям, действующему законодательству, стандартам;
- использование вторичного сырья не приведет к общему неблагоприятному воздействию на окружающую среду и здоровье человека.

Целью исследования является создание условий для развития экономики замкнутого цикла, обеспечивающих максимальное ресурсосбережение, внедрение отечественных рециклинговых технологий и получение регенерируемых строительных материалов в крупных мегаполисах.

Реализация цели исследования заключается в последовательном решении ряда управленческих задач:

- разработка схемы в области обращения со строительными отходами;
- повышение доли предприятий, осуществляющих внедрение новых технологий производства строительных материалов, способствующей созданию эффективной отходоперерабатывающей отрасли в городе;
- осуществление эффективной интеграции экономики города Москвы и прилегающих районов города;
- внедрения инновационных отечественных строительных рециклинговых технологий, обеспечивающих проведение импортозамещения технологий и получение регенерируемых материалов /продуктов с новыми потребительскими свойствами в строительной отрасли, направленное на развитие научно-инновационной сферы и строительной промышленности;
- координация работ в рамках разработанной циклической модели по развитию и реализации рециклинговых технологий в строительной отрасли;
- системное преобразование всего производственного комплекса с использованием природно-ресурсного и производственно-экологического потенциала города;
- участие в привлечении молодых ученых и подготовки квалифицированных кадров на базе созданных во время проекта научных лабораторий в области переработки твердых строительных отходов.

Выводы.

Таким образом, следует учитывать, что предложенный анализ, прогнозирование и оценка могут обеспечить решение основных задач в строительной отрасли, а именно:

- вовлечение строительных отходов в хозяйственный оборот мегаполиса как дополнительного источника сырья и энергии;
- уменьшение утилизируемых строительных отходов;

- формирование инфраструктуры сбора и переработки строительных отходов на попутном производстве предприятий города;
- предотвращение вредного воздействия опасных компонентов строительных отходов на здоровье человека и окружающую среду;
- использование ресурсов и извлечение прибыли из утилизируемого сырья (твердых строительных отходов). Ресурсы по окончании потребления произведенной продукции возвращаются на производство после их переработки.

На российском и региональном рынке представлен широкий диапазон технологий переработки отходов. Однако рост доли перерабатываемых отходов потребления сдерживается отсутствием системы раздельного сбора отходов, являющихся условием для глубокой переработки, а также недостаточным развитием рынка и низким уровнем спроса на продукцию, произведенную из вторичного сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Желтобрюхова В.Ф., Рыбальского Н.Г., Яковлева А.С. Деятельность по обращению с опасными отходами: в 2-х тт. / под общ. ред. М.: РЭФИА, 2003. Т. 2. 444 с.
2. Джексон К., Уоткин Е. «Мусорная» политика ЕС: инструменты контроля // Твердые бытовые отходы. 2013. № 1 (79). С. 54-57.
3. Тихоцкая И.С. Япония: Инновационный подход к управлению ТБО // Твердые бытовые отходы. 2013. № 6 (84). С. 52-57.
4. Цховребов Э.С., Четвертаков Г.В., Шканов С.И. Экологическая безопасность в строительной индустрии. М.: Альфа-М, 2014. 304 с.
5. Цховребов Э.С., Величко Е.Г. Вопросы охраны окружающей среды и здоровья человека в процессе обращения строительных материалов // Строительные материалы. 2014. № 5. С. 99-103.
6. Губенко В.К., Лямзин А.А., Помазков М.В., Губенко О.В. Логистика отходов в мегаполисе // Материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Киев: Мин. транс. и связи Украины, 2009. 200 с.
7. Akers J., Seymour Er. Instrumental exploitation: Predatory property relations at city's end, *Geoforum*, 10.1016/j.geoforum.2018.02.022, 91. 127-140. 2018.
8. Celik N., Antmann E., Shi X., Hayton B. Simulation-based optimization for planning of effective waste reduction, diversion, and recycling programs // *Proc. of the 2015 Industrial and Systems Engineering Research Conference*. Режим доступа: http://www.coe.iami.edu/celik/swmwebsite/publications/Y1_ConferencePaper_I.pdf.
9. Chow G.C. China's economic transformation (2nd ed.). London: Blackwell Publishing Ltd. 2017.
10. Davarian L., Baldwin, Emma S. Crane, Cities, Racialized Poverty, and Infrastructures of Possibility, *Antipode*, 10.1111/anti.12600, 52, 2. 365-379. 2020.
11. Deng F.F., Huang, Y. Uneven land reform and urban sprawl in China: the case of Beijing. *Progress in Planning*, 61, 211–236. 2014.
12. Ding C.R. Urban spatial development in the land policy reform era: evidence from Beijing. *Urban Studies*, 41, 1889–1907. 2014.
13. Dupont V. Conflicting stakes and governance in the peripheries of large Indian metropolises – an introduction. *Cities*, 24(2), 89–94. 2017.
14. George DAR, Lin BC-A, Chen Y. A circular economy model of economic growth. *Environmental Modelling & Software* 73: 60–63. 2015.
15. Gilad S., Alon - Barkat S., Chagai M. Weiss, Bureaucratic politics and the translation of movement agendas, *Governance*, 10.1111/gove.12383, 32, 2. 369 -385. 2018.
16. Heyer J., Palm M., Niemeier D. Are we keeping up? Accessibility, equity and air quality in regional planning, *Journal of Transport Geography*, 10.1016/j.jtrangeo. 2020.102891, 89. 02891. 2020.
17. Ichinose D. Yamamoto M. and Yoshida Y. The decoupling of affluence and waste discharge under spatial correlation: Do richer communities discharge more waste? *Environment and Development Economics* 20:161–184. 2014.
18. Kemeny T., Osman T. The wider impacts of high-technology employment: Evidence from U.S. cities, *Research Policy*, 10.1016/j.respol.2018.06.005, 47, 9. 1729-1740. 2018.
19. Mattiuzzi E. The role of county-level agencies in coordinating local climate planning in California, *Transportation, Land Use, and Environmental Planning*, 10.1016/B97-0-12-815167-9.00021-9. 469-495. 2020.
20. Nixon J.D., Wright D.G., Dey P.K., Ghosh S.K., Davies P.A. A comparative assessment of waste incinerators in the UK // *Waste Management*. No. 33. P. 2234-2244. 2013.

21. Pacewicz J. The Political Economy of the Capitalist State, The New Handbook of Political Sociology, 10.1017/9781108147828. 409-434. 2020.
22. Vahdani B., Tavakkoli-Moghaddam R., Baboli A., Mousavi S. A new fuzzy mathematical model in recycling collection networks: a possibilistic approach // World Academy of Science, Engineering and Technology. No. 78. P. 45-49. 2013.

REFERENCES

1. Zheltobryukhova V.F., Rybalsky N.G., Yakovleva A.S. Activities for handling hazardous waste: in 2 TT. // under the General ed. M.: REFIA, 2003. No. 2. 444 p.
2. Jackson K., Watkin E. "Garbage" policy of the EU: control tools // Solid waste. 2013. No. 1 (79). P. 54-57.
3. Tikhotskii S. I. Japan: an Innovative approach to solid waste management // Solid waste. 2013. No. 6 (84). P. 52-57.
4. Tskhovrebov E.S., Chetvertakov G.V., Shkanov S.I. Environmental safety in the construction industry. Moscow: Alfa-M, 2014. 304 p.
5. Tskhovrebov E.S., Velichko E.G. Issues of environmental protection and human health in the process of circulation of construction materials // Building material. 2014. No. 5. P. 99-103.
6. Gubenko V.K., Lyamzin A.A., Pomazkov M.V., Gubenko O.V. Logistics of waste in megapolis // Materials of the II international. scientific-practical Conf. Kiev: Min. transe. and communications of Ukraine, 2009. 200 p.
7. Akers J., Seymour Er. Instrumental exploitation: Predatory property relations at city's end, Geoforum, 10.1016/j.geoforum.2018.02.022, 91. 127-140. 2018.
8. Celik N., Antmann E., Shi X., Hayton B. Simulation-based optimization for planning of effective waste reduction, diversion, and recycling programs // Proc. of the 2015 Industrial and Systems Engineering Research Conference. Режим доступа: http://www.coe.iami.edu/celik/swmwebsite/publications/Y1_ConferencePaper_I.pdf.
9. Chow G.C. China's economic transformation (2nd ed.). London: Blackwell Publishing Ltd. 2017.
10. Davarian L., Baldwin, Emma S. Crane, Cities, Racialized Poverty, and Infrastructures of Possibility, Antipode, 10.1111/anti.12600, 52, 2. 365-379. 2020.
11. Deng F.F., Huang, Y. Uneven land reform and urban sprawl in China: the case of Beijing. Progress in Planning, 61, 211-236. 2014.
12. Ding C.R. Urban spatial development in the land policy reform era: evidence from Beijing. Urban Studies, 41, 1889-1907. 2014.
13. Dupont V. Conflicting stakes and governance in the peripheries of large Indian metropolises – an introduction. Cities, 24(2), 89-94. 2017.
14. George DAR, Lin BC-A and Chen Y A circular economy model of economic growth. Environmental Modelling & Software 73: 60-63. 2015.
15. Gilad S., Alon - Barkat S., Chagai M. Weiss, Bureaucratic politics and the translation of movement agendas, Governance, 10.1111/gove.12383, 32, 2. 369-385. 2018.
16. Heyer J., Palm M., Niemeier D. Are we keeping up? Accessibility, equity and air quality in regional planning, Journal of Transport Geography, 10.1016/j.jtrangeo. 2020.102891, 89. 02891. 2020.
17. Ichinose D. Yamamoto M. and Yoshida Y. The decoupling of affluence and waste discharge under spatial correlation: Do richer communities discharge more waste? Environment and Development Economics 20:161-184. 2014.
18. Kemeny T., Osman T. The wider impacts of high-technology employment: Evidence from U.S. cities, Research Policy, 10.1016/j.respol.2018.06.005, 47, 9. 1729-1740. 2018.
19. Mattiuzzi E. The role of county-level agencies in coordinating local climate planning in California, Transportation, Land Use, and Environmental Planning, 10.1016/B97-0-12-815167-9.00021-9. 469-495. 2020.
20. Nixon J.D., Wright D.G., Dey P.K., Ghosh S.K., Davies P.A. A comparative assessment of waste incinerators in the UK // Waste Management. No. 33. P. 2234-2244. 2013.
21. Pacewicz J. The Political Economy of the Capitalist State, The New Handbook of Political Sociology, 10.1017/9781108147828. 409-434. 2020.
22. Vahdani B., Tavakkoli-Moghaddam R., Baboli A., Mousavi S. A new fuzzy mathematical model in recycling collection networks: a possibilistic approach // World Academy of Science, Engineering and Technology. No. 78. P. 45-49. 2013.

Информация об авторе:

Степаненко Антон Александрович

АОЧУ ВО «Московский финансово-юридический университет» МФЮА, г. Москва, Россия,
аспирант.

E-mail: lambrador2@gmail.com

Information about the author:

Stepanenko Anton A.

AOCHU VO "Moscow Financial and Legal University "MFLA, Moscow, Russia,
graduate student.

E-mail: lambrador2@gmail.com

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 страницами текста на листах **формата А4** и содержит от **4 до 9 страниц**; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья должна быть набрана шрифтом TimesNewRoman, 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.
- Статья предоставляется в **1 экземпляре** на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна статья одного автора**, включая соавторство.
- **Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.**
- 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)** описывает цели и задачи проведенного исследования, а также возможности его практического применения, указывает, что нового несет в себе материал; рекомендуемый объем – не менее 100 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.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

С полной версией требований к оформлению научных статей
Вы можете ознакомиться на сайте www.oreluniver.ru/science/journal/sir

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) 777-318
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, 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 О.В. Юрова
Компьютерная верстка О.В. Юрова

Подписано в печать 25.03.2021 г.
Дата выхода в свет 25.03.2021 г.
Формат 70×108/16. Печ. л. 8,8
Цена свободная. Тираж 1000 экз.
Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета
на полиграфической базе ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95.