

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)*

Редколлегия:
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)*
Птичницова Г.А., *д-р арх., проф. (Россия)*
Ребож Д., *д-р техн. наук, проф. (Словения)*
Римшин В.И., *чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)*
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:
302006, 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, 2020

Содержание

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

Колчунов В.И., Демьянов А.И., Матвеев М.И. Основные результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций круглого сечения при кручении с изгибом	3
Коробко А.В., Калашникова Н.Г. Зависимость геометрической жесткости кручения прямоугольных сечений от их коэффициента формы и отношения конформных радиусов	14
Кривошапко С.Н. Оболочки и стержневые структуры в форме аналитически незадаваемых поверхностей в современной архитектуре	20
Леонтьев Е.В. Поперечные колебания балки со свободными краями на упругом основании при действии динамической нагрузки	31
Турков А.В., Иванушкина К.А. Взаимосвязь максимальных прогибов и частот собственных колебаний изотропных кольцевых пластин при неоднородных условиях опирания по внешнему и внутреннему контуру	45

Безопасность зданий и сооружений

Алексейцев А.В. Оптимальное проектирование стальных рамных конструкций с учетом уровня механической безопасности	51
Зубрицкий М.А., Ушаков О.Ю., Сабитов Л.С. Оценка сейсмостойкости высотных зданий и сооружений при воздействиях уровня «максимальное расчетное землетрясение» нелинейным статическим методом	63
Федорова Н.В., Медянкин М.Д., Бушова О.Б. Экспериментальное определение параметров статико-динамического деформирования бетона при режимном нагружении	72

Архитектура и градостроительство

Холодова Е.В. «Золотого век» в архитектуре усадебных зданий Курской губернии 1-я половина XVIII - 2-я половина XIX вв.	82
--	----

Строительные материалы и технологии

Баженова С.И., Алексеев В.А. Особенности подбора состава тонкодисперсных вяжущих для инъектирования	99
Казначеев С. В. Композиты контактно-конденсационного твердения с применением промышленных отходов	109
Ткач Е.В., Бичаев М.И. Влияние галлузитовых нанотрубок на физико-механические свойства эпоксидных композитов	120
Щепочкина Ю.А. Искусственный мрамор с включением молотых стеклоотходов	131

Журнал входит в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» ВАК по группе научных специальностей 05.23.00 – Строительство и архитектура: 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки), 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки), 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки), 05.23.05 – Строительные материалы и изделия (технические науки), 05.23.08 – Технология и организация строительства (технические науки), 05.23.17 – Строительная механика (технические науки), 05.23.19 – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства, 05.23.21 – Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура), 05.23.22 – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура).
Индексируется в РИНЦ, RSCI (Russian Science Citation Index) на платформе Web of Science)

BUILDING AND RECONSTRUCTION

Scientific and technical journal
The journal is published since 2003.
The journal is published 6 times a year.

№ 3 (89) 2020

The founder – Federal State Budgetary Educational Institution
of Higher Education

«Orel State University named after I.S. Turgenev»
(Orel State University)

Contents

Theory of engineering structures. Building units

- Kolchunov V.I., Demyanov A.I., Matveev M.I.** Main results of experimental studies of reinforced concrete structures with round cross sections in torsion with bending 3
- Korobko A.V., Kalashnikova N.G.** Dependence of geometrical rigidity of torsion rectangular sections from their coefficient of the form and relations of conformal radiuses 14
- Krivoshapko S.N.** Shells and rod structures in the form of analytically non-given surfaces in modern architecture 20
- Leontiev E.V.** Transverse vibrations of a beam with free edges on an elastic base under dynamic load 31
- Turkov A.V., Ivanushkina K.A.** Relationship of maximum deflections and natural frequencies vibrations of isotropic circular plates with inhomogeneous resistance conditions on the outer and inner contour 45

Building and structure safety

- Alekseytsev A.V.** Optimal design of steel frame structures subject to level of mechanical safety 51
- Zubritskiy M.A., Ushakov O.Y., Sabitov L.S.** Seismic resistance estimation of high-rising structures under ductility level earthquake by nonlinear static method 63
- Fedorova N.V., Medyankin M.D., Bushova O.B.** Experimental determination of the parameters of the static-dynamic deformation of concrete under loading modal 72

Architecture and town-planning

- Kholodova E.V.** "Golden age" in the architecture of manor buildings Kursk province 1st half of the XVIII - 2nd half of the XIX century 82

Construction materials and technologies

- Bazhenova S.I., Alekseev V.A.** Features of selecting the composition of fine-disperse binders for injection 99
- Kaznacheev S. V.** Contact-condensing hardening composites with the use of industrial waste 109
- Tkach E.V., Bichaev M. I.** Influence of halloysite nanotubes on the physical and mechanical properties of epoxy composites 120
- Shchepochkina J.A.** Modification of fine-grained concrete additives crushed plastic 131

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)

Sergeyчук 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:

302006, 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 Rossii»
86294

© Orel State University, 2020

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.

В.И. КОЛЧУНОВ, А.И. ДЕМЬЯНОВ, М.И. МАТВЕЕВ
Юго-Западный Государственный Университет, г.Курск, Россия

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ КРУЧЕНИИ С ИЗГИБОМ

Аннотация. Приведены результаты опытных данных о сложном сопротивлении железобетонных конструкций круглого поперечного сечения из бетона В25, включающие графики прогибов и углов поворота при рассматриваемом напряженном состоянии, а также зависимости деформаций бетона, полученные по показаниям розеток тензотензорезисторов по отношению к исследуемому расчетному сечению. Экспериментально, используя предложенную схему установки тензорезисторов, определены главные деформации удлинения (и укорочения) бетона. Арматура опытных конструкций была подобрана таким образом, что в стадии, предшествующей разрушению в ней достигалась текучесть. Полученные опытные данные позволяют выполнить оценку предложенных для конструкций круглого поперечного сечения методов расчета при рассматриваемом напряженном состоянии, в частности проверку таких расчетных параметров как значения обобщенной нагрузки трещинообразования и уровня этой нагрузки относительно предельной разрушающей нагрузки; расстояния между трещинами на разных уровнях трещинообразования, ширины раскрытия трещин на уровне оси рабочей арматуры и на удалении двух диаметров от осей арматуры, а также вдоль всего профиля трещины на различных ступенях нагружения конструкции, координат точек образования пространственных трещин, схем образования, развития и раскрытия трещин. Испытаниями установлено, что раскрытие трещин в исследуемых конструкциях на уровне оси рабочей арматуры в два-три раза меньше чем их раскрытие на удалении полутора-двух диаметров от оси рабочей (продольной и поперечной) арматуры. Экспериментально установленные опытные параметры и картины трещин позволяют уточнить принятые рабочие гипотезы при построении расчетной модели сопротивления железобетонных конструкций круглого поперечного сечения при кручении с изгибом.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, кручение с изгибом, сложное напряженно-деформированное состояние, железобетонные конструкции, пространственная трещина.

VI.I. KOLCHUNOV, A.I. DEMYANOV, M.I. MATVEEV
South-Western State University, Kursk, Russia

MAIN RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES WITH ROUND CROSS SECTIONS IN TORSION WITH BENDING

Abstract. The article presents the results of experimental studies of the complex stress-strain state in reinforced concrete structures with a round cross-section, made of B25 concrete, which includes graphs of deflection and rotation angles, as well as the dependence of concrete deformations obtained from the indications of strain gauges. The main deformations of elongation (and shortening) of concrete were determined by an experimental method using the proposed scheme for installing strain gauges. Rebar for experimental structures was selected in such a way that it achieved yield stress in the stage before destruction. The obtained experimental data allow us to evaluate the calculation method for circular cross section structures in the considered stress state, in particular checking such calculation parameters as the values of the general load of crack appearing and the level of this load relative to the

distruction load; distance between cracks at different levels of crack formation, width of cracks opening at the level of the main reinforcement axis and at the distance of two diameters from the reinforcement axis, coordinates of spatial cracks formation, schemes of crack formation, crack development and crack opening. The experiment found that the width crack opening at the level of the main reinforcement axis is two to three times less than at a distance of two diameters from the main longitudinal (or transverse) reinforcement axis. The parameters and crack patterns established during the experiments allow us to clarify the accepted working hypotheses for constructing a calculation model of the resistance in reinforced concrete structures of circular cross-section under torsion with bending.

Keywords: *experimental studies, torsion with bending, complex stress-strain state, reinforced concrete structures, spatial crack.*

1 Введение.

Расширение области применения железобетонных конструкций ведет к увеличению числа воздействий на эти конструкции и как следствие к усложнению видов напряженного состояния в таких конструкциях. Разнообразие и уникальность архитектурных форм, как правило, также способствует созданию сложного сопротивления в элементах конструкций, в частности сопротивления вызванного кручением с изгибом, что влечет за собой необходимость экспериментально-теоретических исследований. Сопротивление железобетонных конструкций при таком напряженном состоянии изучено в настоящее время недостаточно глубоко. Об этом свидетельствуют известные публикации, например [1–12], а также то, что в отечественных и зарубежных нормах нормативных документах отсутствуют детальные рекомендации по проектированию конструкций при кручении с изгибом, а приведены только общие положения их расчета, да и те касаются лишь предельных состояний первой группы, касаются лишь отдельных частных случаев видов сечений, схем армирования и видов напряженного состояния которые не всегда согласуются с реальной работой железобетона в стадии образования, развития трещин, а также в предельной стадии их сопротивления. Подавляющее число научных теоретических и экспериментальных исследований по этой проблеме относится к конструкциям прямоугольного сечения [3–6, 8–12]. В то же время применение конструкций с другими формами сечений (круглые, квадратные, кольцевые, эллипсовидные) из бетонов и комбинированных материалов разной прочности [17–20] находит все большее применение, в том числе и в ответственных конструкциях зданий и сооружений, таких как ядра жесткости высотных зданий, колонны каркасов зданий, конструкции обвязочных ригелей, конструкции мостовых опор и др. В этой связи проведение новых исследований и особенно экспериментальных исследований по установлению особенностей деформирования трещинообразования и разрушения железобетонных конструкций при кручении с изгибом с новыми формами сечений представляет актуальную задачу. В рассматриваемой статье представлены некоторые результаты экспериментальных исследований жесткости и трещиностойкости железобетонных балок круглого поперечного сечения из бетона В25 при кручении с изгибом.

2 Результаты исследований и их анализ.

В работах [7, 13, 14] авторами был предложен общий метод расчета железобетонных конструкций с сечениями произвольной формы при кручении с изгибом. Однако отсутствие опытных данных о деформациях, схемах трещинообразования, количественных значениях раскрытия трещин для конструкций круглого поперечного сечения не позволяют обобщить и верифицировать этот метод на расчет такого типа конструкций. Для того чтобы проверить достоверность предлагаемого расчетного аппарата для железобетонных конструкций круглого поперечного сечения и установить закономерности и особенности их сопротивления при кручении с изгибом были проведены экспериментальные исследования по специально разработанной методике позволяющие опытным путем установить ряд новых параметров заложенных в расчетной модели. Армирование, характеристики и маркировка опытных кон-

струкций, а также методика их испытаний приведена в работах [14, 15].

Полученные опытные данные и их анализ позволяют отметить следующее. Характерной особенностью трещинообразования в конструкциях круглого поперечного сечения являлось то, что при кручении с соотношением крутящего и изгибающего момента более единицы и нагрузках, превышающих нагрузки трещинообразования, на поверхности опытной конструкции происходит образование нескольких трещин (рисунок 1). До момента разрушения в конструкции, как правило, образуется два-три уровня трещин. При дальнейшем увеличении нагрузок из образовавшихся трещин выделяется одна та, которая впоследствии и является разрушающей. Эта трещина на ступенях близких к разрушению начинает превалировать по раскрытию над остальными и к моменту разрушения имеет максимальную ширину раскрытия.

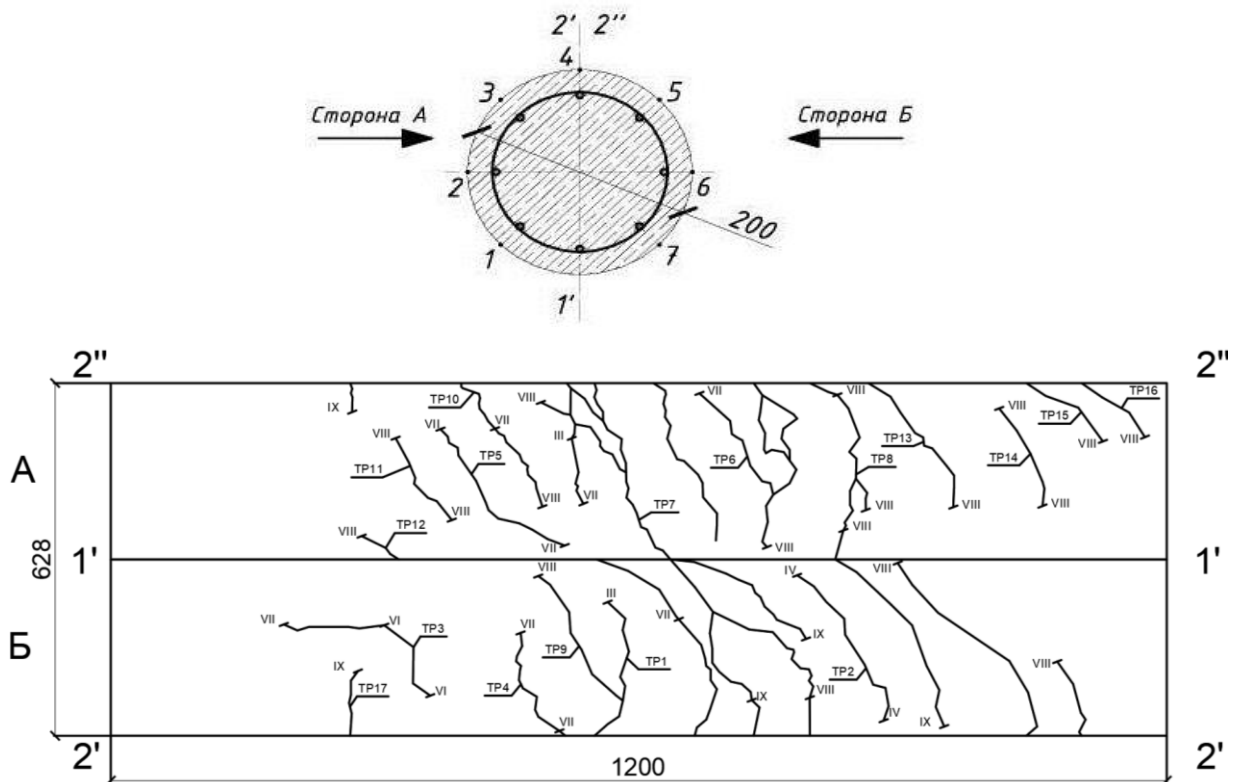


Рисунок 1 – Картина трещинообразования в экспериментальной опытной конструкции Б-КР-720 (1)

Уместно также отметить, что по мере увеличения этапов нагружения количество трещин увеличивалось. При этом новые трещины образовывались на конкретном уровне нагружения образовывались в промежутках расстояний между уже образовавшимися трещинами на предыдущих этапах нагружения, т.е. трещинообразование носило уровневый характер [1, 2].

Испытания каждой экспериментальной конструкции сопровождалось специальным ведением журнала испытаний в котором фиксировались опытные значения опорной реакции конструкций балок на этапе образования первых трещин ($R_{sup,crc}$) и на этапе предельной нагрузки перед разрушением ($R_{sup,max}$) максимальная величина нагрузки на балку (P_{max}), относительный уровень ступени нагружения (P_i/P_{max}), ширина раскрытия прогрессирующей пространственной трещины по которой произошло разрушение, а так же значение проекций пространственных трещин на горизонталь, координаты образования прогрессирующей пространственной трещины (x_{exp} , y_{exp}) и фактическая высота сжатой зоны в пространственном сечении (x_{fact}). Полученные данные обработаны, систематизированы и приведе-

ны в таблице 1.

В процессе испытаний на каждом этапе нагружения были измерены прогибы конструкций опытных балок (рисунок 2) и перемещения установленных по концам опытных балок жестких консолей, по которым были вычислены углы поворота в конструкциях (рисунок 3). Анализируя графики можно отметить следующее. Уровень нагрузки трещинообразования в опытных конструкциях балок Б-КР-720 (1) составил порядка 0.6 от разрушающей нагрузки и 0.52 - в балках Б-КР-720 (2). Этот относительный показатель значительно выше чем для балок, нагруженных только изгибающим моментом. Из этого следует, что при кручении с изгибом и относительно высоких уровнях напряженного состояния от кручения ($T/M > 1$), когда доля касательных напряжений в общей структуре сложного напряженного состояния пространственного сечения значительна, относительная трещиностойкость конструкции повышается, т.е. относительный диапазон работы конструкции без трещин на всей диаграмме деформирования увеличивается.

Сопоставляя приведенные графики углов поворота и прогибов опытной конструкции балки Б-КР-720 (1)

Круглого поперечного сечения можно видеть, что после образования трещин падение изгибной жесткости конструкции происходит более интенсивно чем жесткости конструкции на кручение. Связано это, по-видимому, с проявлением сил нагельного эффекта и сил зацепления в пространственной брешине.

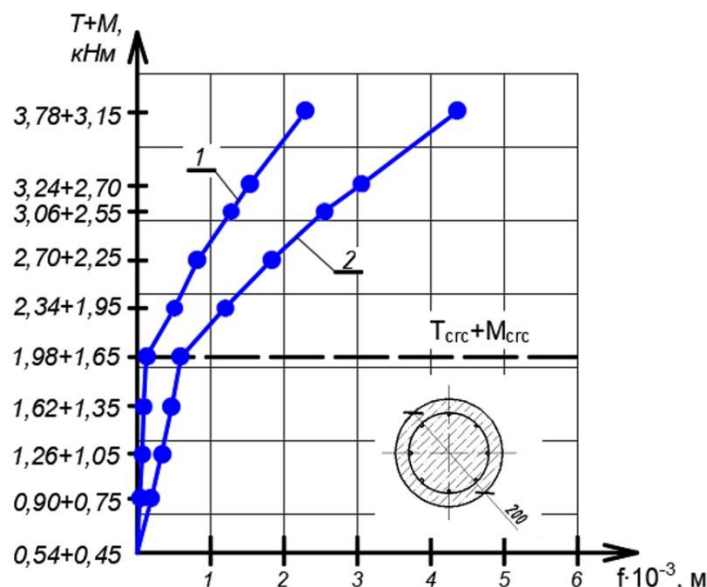


Рисунок 2 – Графики прогибов опытной конструкции Б-КР-720 (1):
1 – прогиб по индикатору И2; 2 – прогиб по индикатору И3

По показаниям тензорезисторов установленным в виде розеток в наиболее напряженной зоне стороны А и стороны В для опытных конструкций Б-КР-720 (1) построены графики «нагрузка – относительная деформация». Показания тензорезисторов розеток обрабатывались в соответствии с формулой для определения главных деформаций удлинения (укорочения) бетона:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2}, \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2\varepsilon_{45} - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{90})}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}, \quad (3)$$

где ε_0 , ε_{45} , ε_{90} – значения деформаций тензорезисторов расположенных под углами 0° , 45° и 90° к продольной оси экспериментального образца соответственно.

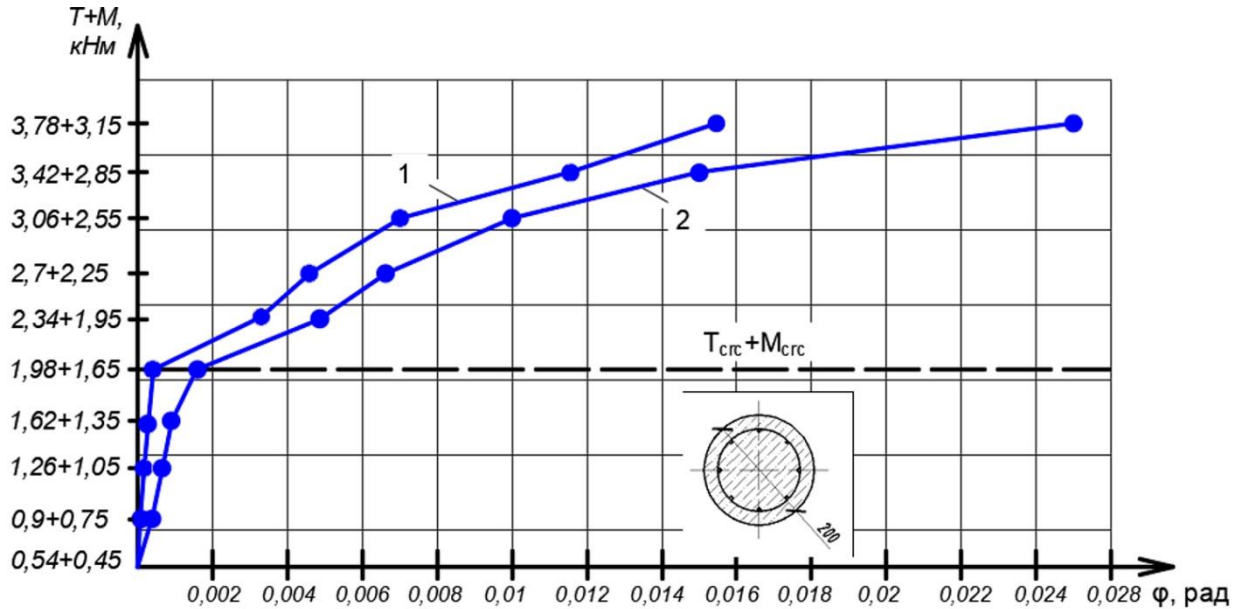


Рисунок 3 – Графики углов поворота опытной конструкции Б-КР-720 (1):
1 – угол поворота по индикаторам И1-И2; 2 – угол поворота по индикаторам И3-И4

Показания розеток тензорезисторов обрабатывались для получения значений этих величин при различных уровнях нагружения. В частности, для экспериментальной конструкции Б-КР-720 (сторона А) при нагрузках равной 0,6; 0,8 и 1 от разрушающей получено:

Степень нагружения $\frac{P_i}{P_{\max}} = 1,0$.

$$\varepsilon_1 = \frac{1188 + (-570)}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(1188 - (-1462))^2 + ((-1462) - (-570))^2} = 2280,2,$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1188 + (-570)}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(1188 - (-1462))^2 + ((-1462) - (-570))^2} = -1662,2,$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2(-1462) - (1188 + (-570))}{1188 - (-570)} = -2,01 (32 \text{ град}).$$

Степень нагружения $\frac{P_i}{P_{\max}} = 0,8$

$$\varepsilon_1 = \frac{434 + (-242)}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(434 - (-529))^2 + ((-529) - (-242))^2} = 804,4,$$

$$\varepsilon_2 = \frac{434 + (-242)}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(434 - (-529))^2 + ((-529) - (-242))^2} = -612,4,$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2(-529) - (434 + (-242))}{434 - (-242)} = -1,85 (31 \text{ град}).$$

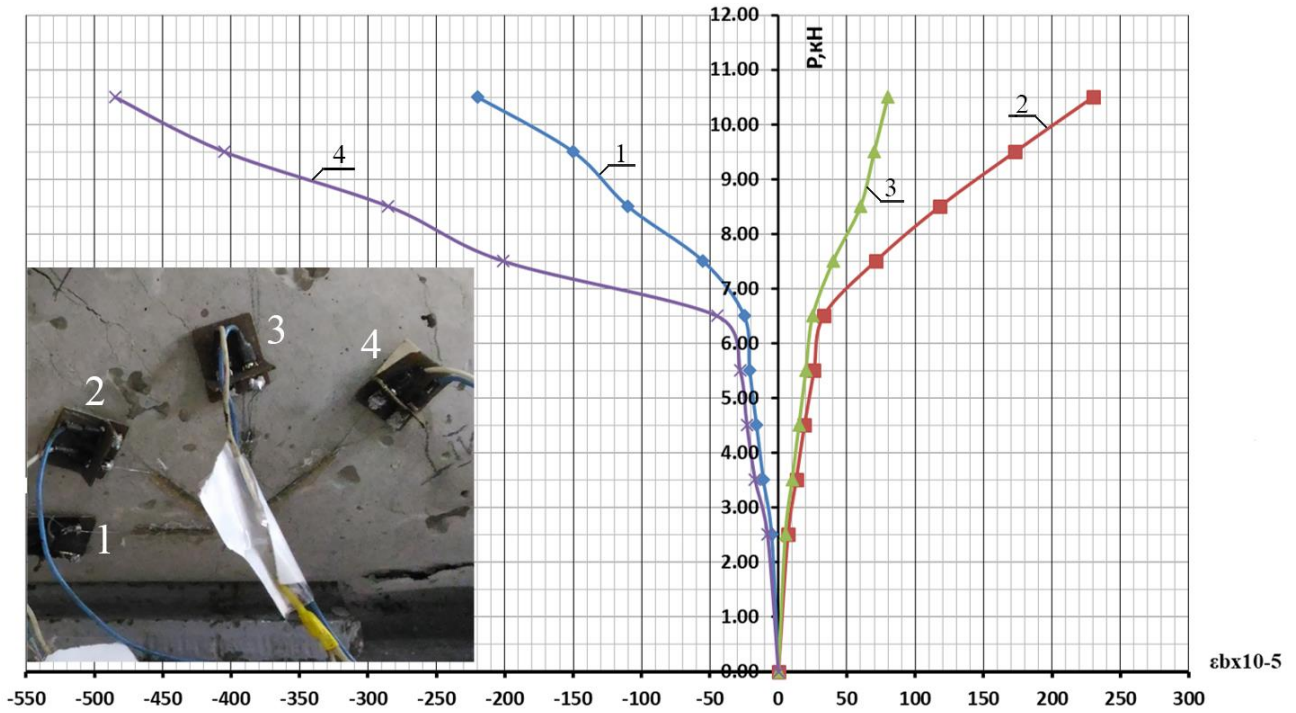


Рисунок 4 – Графики зависимости деформаций бетона от нагрузки для опытной конструкции Б-КР-720(1), сторона А: 1,2,3,4-соответственно, по тензорезисторам 1-4

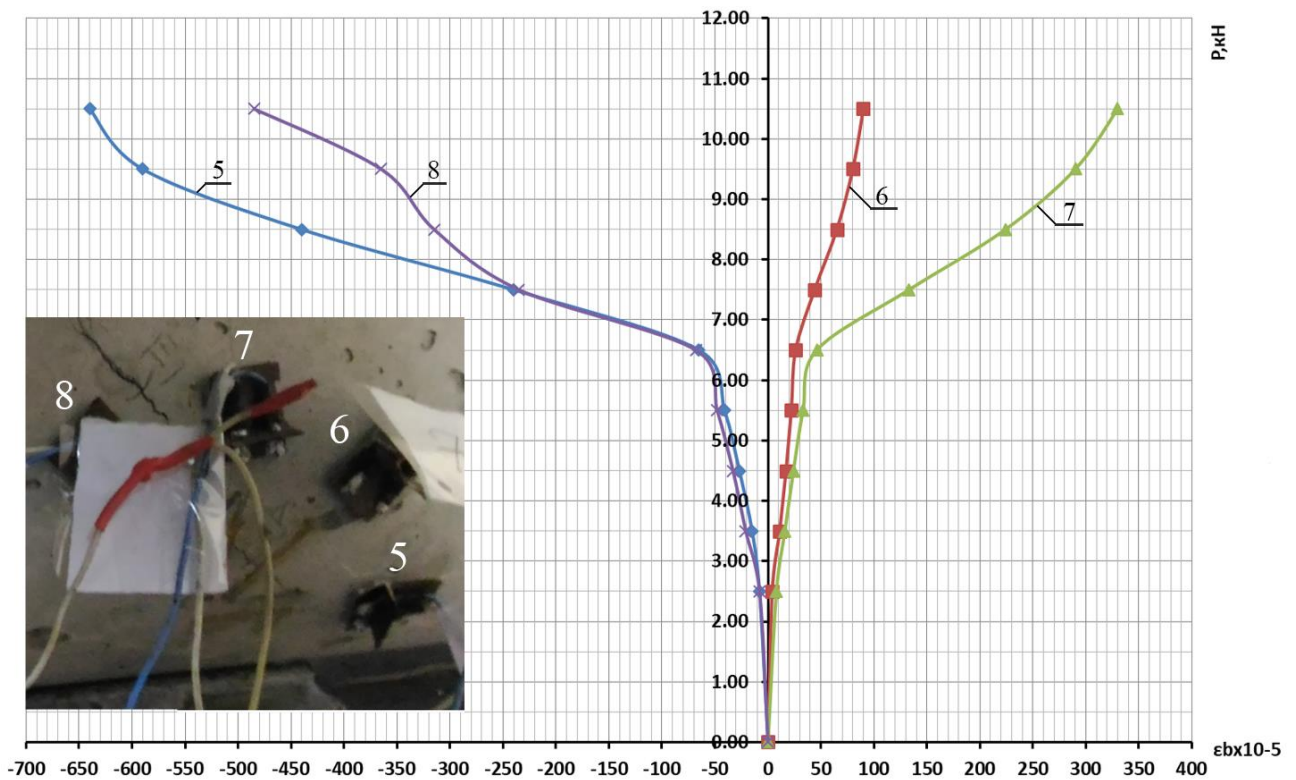


Рисунок 5 – Графики зависимости деформаций бетона от нагрузки для опытной конструкции Б-КР-720(1), сторона Б

Степень нагружения $\frac{P_i}{P_{\max}} = 0,6$

$$\varepsilon_1 = \frac{98 + (-132)}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(98 - (-135))^2 + ((-135) - 98)^2} = 215.3;$$

$$; \varepsilon_2 = \frac{98 + (-132)}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(98 - (-135))^2 + ((-135) - 98)^2} = -249.3$$

$$tg 2\varphi = \frac{2(-135) - (98 + (-132))}{98 - (-132)} = 1,03(23град).$$

Аналогично для конструкции БФ-КР-720 (сторона Б), получено:

Степень нагружения $\frac{P_i}{P_{\max}} = 1,0$

$$\varepsilon_1 = \frac{-925 + (-705)}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-925) - 2235)^2 + (2235 - (-705))^2} = 2227.9;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{-925 + (-705)}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-925) - 2235)^2 + (2235 - (-705))^2} = -3857.9;$$

$$tg 2\varphi = \frac{2 \cdot 2235 - ((-925) + (-705))}{925 - (-705)} = 3,74(38град)$$

Степень нагружения $\frac{P_i}{P_{\max}} = 0,8$

$$\varepsilon_1 = \frac{-503 + (-295)}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-503) - 1268)^2 + (1268 - (-295))^2} = 1025.6 ;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{-503 + (-295)}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-503) - 1268)^2 + (1268 - (-295))^2} = -1823.6 ;$$

$$tg 2\varphi = \frac{2 \cdot 1268 - ((-503) + (-295))}{-503 - (-295)} = -16,03(43град).$$

Степень нагружения $\frac{P_i}{P_{\max}} = 0,6$

$$\varepsilon_1 = \frac{-137 + (-115)}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-137) - 98)^2 + (98 - (-115))^2} = 97.6 ;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{-137 + (-115)}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{((-137) - 98)^2 + (98 - (-115))^2} = -349.6 ;$$

$$tg 2\varphi = \frac{2 \cdot 98 - ((-137) + (-115))}{-137 - (-115)} = -20,4(44град).$$

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования железобетонных конструкций при кручении с изгибом позволили проверить разрабатываемую расчетную модель, ее рабочие предпосылки и выявить закономерности и параметры сопротивления железобетонных конструкций, такие как координаты образования пространственных трещин; обо-

щенная нагрузка трещинообразования $R_{sup,crc}$ и разрушения $R_{sup,u}$ ширина раскрытия трещин на уровне осей продольной и поперечной растянутой арматуры на удалении двух диаметров от осей арматуры и вдоль всего профиля трещины; изменения расстояния между трещинами l_{crc} и длины трещин h_{crc} по мере увеличения нагрузки; фибровые главные деформации сжатого бетона при сложном напряженно-деформированном состоянии (см. таблицу).

Таблица 1 – Экспериментальные параметры сопротивления железобетонных конструкций при кручении с изгибом

Шифр конструкции	$R_{sup,crc}$, кН	$R_{sup,max}$, кН	P_{max} , кН	Степень нагружения P_i/P_{max}	Пространственная трещина, по которой произошло разрушение			Фактическая высота сжатой зоны, x_{fact} , мм	Координаты образования пространственной трещины	
					$a_{crc,1}$, мм	$a_{crc,2}$, мм	$l_{crc,max}$, мм		x_{exp} , мм	y_{exp} , мм
<i>I</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>
Б-КР-720 (1) Сторона А	3.25	5.25	10.5	0.62	–	–	255	–	- 81.3	- 12.5
				0.81	2	5		12		
				1	18	16		0		
Б-КР-720 (1) Сторона Б	3.25	5.25	10.5	0.62	–	–	255	–	174.7	33.9
				0.81	4	6		42		
				1	12	16		0		
Б-КР-720 (2) Сторона А	2.75	5.25	10.5	0.62	–	–	279	–	- 84.8	- 14.3
				0.81	2	5		48		
				1	5	8		12		
Б-КР-720 (2) Сторона Б	2.75	5.25	10.5	0.62	–	–	279	–	194.1	43.6
				0.81	4	7		22		
				1	10	12		0		

В итоге данные, полученные в результате проведенных экспериментальных исследований предоставляют возможность проверить достоверность расчетного аппарата для железобетонных конструкций при сложном сопротивлении, вызванном совместным действием кручения с изгибом.

3 Выводы

1. Экспериментальными исследованиями железобетонных конструкций круглого поперечного сечения получены новые опытные данные о сложном напряженно-деформированном состоянии в сечениях таких конструкций в исследуемых при действии изгибающего и крутящего моментов, такие опытные параметры как: значения обобщенной нагрузки трещинообразования $R_{sup,crc}$ и разрушения $R_{sup,u}$, уровень трещинообразующей нагрузки относительно предельной; расстояние между трещинами на разных уровнях трещинообразования, ширина раскрытия трещин на уровне оси рабочей арматуры на удалении двух диаметров от осей арматуры и вдоль всего профиля трещины. на различных ступенях нагружения, координаты точек образования пространственных трещин; схемы образования и развития трещин железобетонных конструкций при кручении с изгибом.

2. Полученные опытные графики перемещений (прогибов и углов поворота) и графики деформаций бетона в окрестности расчетного сечения 1–1 позволяют оценить деформативности и жесткостные характеристики исследуемых конструкций на всех стадиях нагружения с учетом трещинообразования и дают возможность проверки раз-

рабатываемой расчетной модели оценки сопротивления железобетонных конструкций при действии кручения с изгибом по предельным состояниям второй группы.

3. Установлено, что для железобетонных конструкций круглого поперечного сечения из бетона В25 на начальных этапах образовывалось несколько пространственных трещин, из которых, по мере увеличения нагрузки выделяется одна прогрессирующая по ширине раскрытия, по которой и происходит разрушение. На ступенях, предшествующих разрушению, эта трещина начинает интенсивно превалировать над остальными и имеет максимальную ширину раскрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голышев А. Б. Сопротивление железобетона / А. Б. Голышев, В. И. Колчунов. – К.: Основа, 2009. – 432 с.
2. Бондаренко В.М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов. – М.: АСВ, 2004. – 472 с.
3. Iakovenko I., Kolchunov V., Lyamar I. (2017). Rigidity of reinforced concrete structures in the presence of different cracks. MATEC Web of Conferences. 6th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings». Transbud-2017. Kharkiv, Ukraine, April 19–21. 2017. Vol. 0216. 12 p.
4. Demyanov A., Kolchunov V.I. (2017). The dynamic loading in longitudinal and transverse reinforcement at instant emergence of the spatial crack in reinforced concrete element under the action of a torsion with bending. Journal of Applied Engineering Science, vol. 15(2017)3, article 456, pp. 375–380. doi:10.5937/jaes15-14663
5. Vishnu H. Jariwalaa, Paresh V. Patel, Sharadkumar P. Purohit. Strengthening of RC Beams subjected to Combined Torsion and Bending with GFRP Composites. Procedia Engineering. 2013. Vol. 51. Pp. 282–289.
6. Khaldoun Rahal. Combined Torsion and Bending in Reinforced and Prestressed Concrete beams Using Simplified Method for Combined Stress-Resultants. ACI Structural Journal. 2007. Vol. 104. No. 4. Pp. 402–411.
7. V. I. Kolchunov, A. I. Dem'yanov, N. V. Naumov. The second stage of the stress-strain state of reinforced concrete constructions under the action of torsion with bending (Theory) // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020, Vol. 753, article 032056, pp. 1-9.
8. David A. E., Thomas L. H., Simon A. N., Jonathan E. C. Veering and nonlinear interactions of a clamped beam in bending and torsion // Journal of Sound and Vibration. 2018. Vol. 416. Pp. 1-16.
9. Loïc B., Guilhem M., Rached F., Bruno C. Static and dynamic analysis of bending–torsion coupling of a CFRP sandwich beam // Composite Structures. 2016. Vol. 145. Pp. 26–36.
10. Ogawa Y., Kawasaki Y., Okamoto T. Fracture behavior of RC members subjected to bending shear and torsion using acoustic emission method // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 67. Pp. 165–169.
11. Lukina A.A., Kholopova I.S., Alpatova V.Y., Solovieva A.V. Beams with corrugated web: calculation peculiarities of bending torsion analysis // Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. Pp. 414-418.
12. Kashani M.T., Hashemi S.M. A finite element formulation for bending-torsion coupled vibration analysis of delaminated beams under combined axial load and end moment // Shock and Vibration. 2018. Vol. 2018. article 1348970. Pp. 1-13.
13. Колчунов Вл. И., Демьянов А. И. К определению напряженно-деформированного состояния стержней произвольного поперечного сечения при кручении методами сопротивления материалов // Строительство и реконструкция. 2019. №1(81). С. 10–22.
14. Kolchunov V.I., Demyanov A.I., Naumov N.V. The second stage of stressed-deformed condition of reinforced concrete structures when turning with bending (Case 2). International journal for computational civil and structural engineering. 2019. Vol. 15. No. 4. Pp 66–82.
15. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов В.И., Каприелов С.С., Демьянов А.И., Конорев А.И. Основные результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций из высокопрочного бетона В100 круглого и кольцевого сечений при кручении с изгибом // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. № 15(1). С. 51-61.
16. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов В.И., Каприелов С.С., Демьянов А.И., Конорев А.В. Результаты экспериментальных исследований конструкций квадратного и коробчатого сечений из высокопрочного бетона при кручении с изгибом. Строительство и реконструкция. 2018. №6. С. 32-43.
17. Prakash Shanmugam, Suriya & Li, Qian & Belarbi, Abdeldjelil. Behavior of Circular and Square Reinforced Concrete Bridge Columns under Combined Loading Including Torsion. ACI Structural Journal. 2012. Vol. 109. Pp. 317-327.
18. Awadh E.A. Torsion plus bending and shear on reinforced concrete beams. Journal of Engineering and Sustainable Development. 2016. No.4. P. 277– 288.

19. Ilker Kalkan, Saruhan Kartal. Torsional Rigidities of Reinforced Concrete Beams Subjected to Elastic Lateral Torsional Buckling. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2017. Vol. 11 No.7. Pp. 969–972.
20. Amin, A, Bentz, E.C. Strength of steel fiber reinforced concrete beams in pure torsion. *Structural Concrete*. 2018. No.19. Pp. 684– 694

REFERENCES

1. Golyshev A. B. *Soprotivleniye zhelezobetona* [The resistance of reinforced concrete], Kiev: Basis, 2009. 432 p. (rus)
2. Bondarenko V.M. *Raschetnye modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona* [The computational model of a power resistance of reinforced concrete]. Moscow: ASV, 2004. 472 p. (rus)
3. Iakovenko I., Kolchunov V., Lymar I. Rigidity of reinforced concrete structures in the presence of different cracks. *MATEC Web of Conferences*. 6th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings». Transbud-2017. Kharkiv, Ukraine, April 19–21. 2017. Vol. 0216. 12 p.
4. Iakovenko I., Kolchunov VI. The development of fracture mechanics hypotheses applicable to the calculation of reinforced concrete structures for the second group of limit states. *Journal of Applied Engineering Science*, vol. 15(2017)3, article 455, pp. 366–375. doi:10.5937/jaes15-14662
5. Vishnu H. Jariwalaa, Paresh V. Patel, Sharadkumar P. Purohit. Strengthening of RC Beams subjected to Combined Torsion and Bending with GFRP Composites. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 51. Pp. 282–289.
6. Rahal K. N. & Collins M. P. (2006) Compatibility Torsion in Spandrel Beams Using Modified Compression Field Theory // *ACI Structural Journal*. 103(3), 328–338.
7. Demyanov A. I. & Kolchunov VI. I. (2018) To the approximation of rectangular and complex cross-sections of reinforced concrete structures under the action torsion with bending. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 456, 012104, 1-12. Doi:10.1088/1757-899X/456/1/012104
8. David A. E., Thomas L. H., Simon A. N. & Jonathan E. C. (2018) Veering and nonlinear interactions of a clamped beam in bending and torsion. *Journal of Sound and Vibration*. 416, 1-16.
9. Loïc B., Guilhem M., Rached F. & Bruno C. (2016) Static and dynamic analysis of bending–torsion coupling of a CFRP sandwich beam. *Composite Structures*. 145, 26–36. Doi: 10.1016/j.compstruct.2016.02.055
10. Ogawa Y., Kawasaki Y. & Okamoto T. (2014) Fracture behavior of RC members subjected to bending shear and torsion using acoustic emission method. *Construction and Building Materials*. 67, 165–169. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.100
11. Lukina A. A., Kholopova I. S., Alpatova V. Y. & Solovieva A. V. (2016) Beams with corrugated web: calculation peculiarities of bending torsion analysis. *Procedia Engineering*. 153, 414-418. Doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.143
12. Kashani M. T. & Hashemi S. M. (2018) A finite element formulation for bending-torsion coupled vibration analysis of delaminated beams under combined axial load and end moment. *Shock and Vibration*. 2018, 1348970, 1-13.
13. Kolchunov VI. I. & Demyanov A. I. (2019) K opredeleniyu napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sterzhney proizvolnogo poperechnogo secheniya pri kruchenii metodami soprotivleniya materialov [To determination of stress-strain state for a rod of arbitrary cross-section under torsion using resistance of materials]. *Buildings and Reconstruction*. 81(1), 10–22. (rus)
14. Murashev V. I. (1950) *Treshchinoustoychivost, zhestkost i prochnost zhelezobetona* [Crack resistance, stiffness and strength of reinforced concrete]. Moscow: Mashstroyizdat Publ., 268. (rus)
15. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov VI.I., Kapriyelov S.S., Dem'yanov A.I., Konorev A.I. *Osnovnye rezul'taty eksperimental'nyh issledovaniy zhelezobetonnykh konstrukcij iz vysokoprochnogo betona V100 kruglogo i kol'cevogo sechenij pri kruchenii s izgibom* [Main results of experimental studies of reinforced concrete structures of high-strength concrete B100 round and circular cross sections in torsion with bending]. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, No. 15(1). Pp. 51-61. (rus)
16. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kapriyelov S.S., Dem'yanov A.I., Konorev A.V. The results of experimental studies of structures square and box sections in torsion with bending. *Building and Reconstruction*. 2018. No 6. Pp. 32-43. (rus)
17. Prakash Shanmugam, Suriya & Li, Qian & Belarbi, Abdeldjelil. Behavior of Circular and Square Reinforced Concrete Bridge Columns under Combined Loading Including Torsion. *ACI Structural Journal*. 2012. Vol. 109. Pp. 317-327.
18. Awadh E.A. Torsion plus bending and shear on reinforced concrete beams. *Journal of Engineering and Sustainable Development*. 2016. No.4. P. 277– 288.

19. Ilker Kalkan, Saruhan Kartal. Torsional Rigidities of Reinforced Concrete Beams Subjected to Elastic Lateral Torsional Buckling. International Journal of Civil and Environmental Engineering. 2017. Vol. 11 No.7. Pp. 969–972.

20. Amin, A, Bentz, E.C. Strength of steel fiber reinforced concrete beams in pure torsion. Structural Concrete. 2018. No.19. Pp. 684– 694

Информация об авторах

Колчунов Владимир Иванович

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск
Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры уникальные здания и сооружения
E-mail: vlik52@mail.ru

Демьянов Алексей Иванович

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск
канд. техн. наук, доцент
E-mail: speccompany@gmail.com

Матвеев Максим Игоревич

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск
Аспирант кафедры уникальных зданий и сооружений
E-mail: vlik52@mail.ru

Information about authors

Kolchunov Vladimir I.

South-Western State University, Kursk
Doctor in Technical Sciences, Professor, Professor, Department of unique building and structures
E-mail: vlik52@mail.ru

Demyanov Aleksey I.

South-West State University, Kursk, Russia,
Candidate in Technical Science, Docent, Associated Professor, Department of unique building and structures
E-mail: speccompany@gmail.com

Matveev Maksim I.

South-Western State University, Kursk
Postgraduate student, Department of unique building and structures
E-mail: vlik52@mail.ru

А.В. КОРОБКО¹, Н.Г. КАЛАШНИКОВА¹¹ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Россия

ЗАВИСИМОСТЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ КРУЧЕНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ ОТ ИХ КОЭФФИЦИЕНТА ФОРМЫ И ОТНОШЕНИЯ КОНФОРМНЫХ РАДИУСОВ

Аннотация. Конструкции, испытывающие деформации кручения, широко распространены в строительстве, поэтому разработка и совершенствование методов расчета таких конструкций является одной из актуальных задач строительной механики и теории упругости. Точные решения могут быть получены лишь для стержней с эллиптическим и прямоугольным поперечным сечением, в остальных случаях приходится прибегать к использованию приближенных аналитических или численных методов, многие из которых являются достаточно трудоемкими. В связи с этим целью настоящей статьи является демонстрация новых возможностей применения методов интерполяции к решению задач свободного кручения призматических стержней. В статье приводится сопоставление значений приведенной геометрической жесткости прямоугольных сечений при свободном кручении стержня, полученных с использованием точного и приближенных решений. Точное решение представлено в зависимости от отношения сторон прямоугольника, а приближенные решения – в зависимости от геометрических аргументов – коэффициента формы и отношения конформных радиусов (внутреннего к внешнему). В первом случае для прямоугольных сечений в диапазоне $1 \leq a/b \leq 8$ погрешность получаемых решений составляет 2%, а во втором – 3,2%.

Ключевые слова: кручение упругих стержней, прямоугольное сечение, геометрическая жесткость кручения, коэффициент формы, отношение конформных радиусов.

A.V. KOROBKO¹, N.G. KALASHNIKOVA¹¹Orel state University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia

DEPENDENCE OF GEOMETRICAL RIGIDITY OF TORSION RECTANGULAR SECTIONS FROM THEIR COEFFICIENT OF THE FORM AND RELATIONS OF CONFORMAL RADIUSSES

Abstracts. Structures experiencing torsion strains are widespread in construction, therefore, the development and improvement of methods for calculating such structures is one of the urgent problems of building mechanics and elasticity theory. Exact solutions can be obtained only for rods with an elliptical and rectangular cross-section; in other cases, it is necessary to resort to the use of approximate analytical or numerical methods, many of which are quite laborious. In this regard, the purpose of this article is the demonstration of new possibilities of applying the interpolation methods to solving problems of free torsion of prismatic rods. The article compares the values of reduced geometric stiffness of straight-angle cross sections for free torsion of a rod, obtained using exact and approximate solutions. The exact solution is presented depending on the ratio of the sides of the rectangle, and the approximate solutions - depending on the geometric arguments - the shape factor and the ratio of the conformal radii (inner to outer). In the first case, for rectangular sections in the range $1 < a/b < 8$, the error of the solutions obtained is 2%, and in the second case, 3.2%.

Keywords: torsion of elastic rods, rectangular cross-section, geometric torsion stiffness, shape coefficient, the ratio of conformal radii.

Введение

Конструкции, испытывающие деформации кручения, широко распространены в строительстве и машиностроении, поэтому разработка и совершенствование методов расчета таких конструкций является одной из актуальных задач строительной механики и теории упругости [1]. При расчете стержней на кручение в первую очередь определяется геометрическая жесткость кручения I_k стержня, а затем с её помощью исследуется его напряженно-деформированное состояние (НДС). В строительной механике известно лишь два точных решения рассматриваемой задачи – это стержни с эллиптическим и прямоугольным сечением. В остальных случаях используются различные приближенные аналитические и численные методы [1], которые являются достаточно трудоемкими.

В последние десятилетия к решению задач на кручение привлекаются геометрические методы – изопериметрический метод (ИЗПМ) [2] и метод интерполяции по коэффициенту формы (МИКФ) [3]. В основу этих методов положены изопериметрические свойства геометрической жесткости кручения сечений и интегральных геометрических характеристик – коэффициента формы K_f и отношения конформных радиусов (внутреннего к внешнему \bar{r}/\bar{r}) [3, ..., 8]. Как показали проведенные исследования, указанные геометрические характеристики K_f и \bar{r}/\bar{r} являются аналогами геометрической жесткости сечений I_k . Оказалось, что геометрическая жесткость прямоугольных сечений образует нижнюю границу для всего множества значений I_k для стержней в виде произвольных треугольников и четырехугольников с выпуклым внешним контуром.

Некоторые задачи о взаимосвязи $I_k - K_f$ уже рассмотрены в научной литературе [3, 6, 7, 8], а к исследованию взаимосвязи $I_k - \bar{r}/\bar{r}$ еще практически не приступали. Известны лишь публикации [6...8], в которых использован аргумент \bar{r}/\bar{r} при исследовании задач поперечного изгиба, свободных колебаний и устойчивости упругих пластинок с выпуклым контуром и комбинированными граничными условиями (комбинация условий жесткого защемления и шарнирного опирания). В связи с этим целью опубликования настоящей статьи является показать специалистам в области строительной механики новые открывающиеся возможности применения методов интерполяции к решению задач свободного кручения призматических стержней.

Представление геометрической жесткости прямоугольных сечений в зависимости от коэффициента формы и отношения конформных радиусов

В математической физике [9] известно решение для определения геометрической жесткости прямоугольных сечений I_k , представленное двойным тригонометрическим рядом:

$$I_k = \frac{256}{\pi^6} ab \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{\ell=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{k^2 \ell^2 \left(\frac{k^2}{a^2} + \frac{\ell^2}{b^2} \right)}, \quad (1)$$

где a и b – стороны прямоугольного сечения.

При $k = \ell = 1$ получаем лучшую нижнюю оценку I_k :

$$\begin{aligned} I_k &> \frac{256}{\pi^6} ab \frac{1}{\left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)} = \frac{256}{\pi^6} \frac{a^3 b^3}{a^2 + b^2} = \\ &= \frac{1024}{\pi^6} \frac{A^2}{4(a/b + b/a)} = 1,065 \frac{A^2}{K_f}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $K_f = 4(a/b + b/a)$ – коэффициент формы прямоугольника.

Коэффициент формы для произвольной односвязной плоской области с выпуклым контуром представляется контурным интегралом

$$K_f = \min_L \oint ds/h, \quad (3)$$

где L – контур области;

ds – элемент дуги контура;

h – перпендикуляр, опущенный из точки, взятой внутри области на касательную к переменной точке контура (рисунок 1).

Коэффициент формы является количественной характеристикой формы области: чем меньше K_f , тем более «правильнее» фигура, например, из всех прямоугольников наименьшее значение K_f имеет квадрат. Подробные сведения об этой интегральной геометрической характеристике, её изопериметрических свойствах и возможностях использования при решении задач теории упругости приведены в монографии [3].

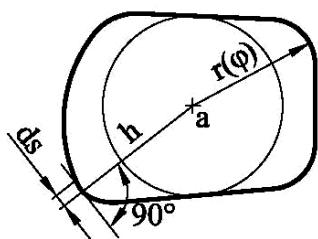


Рисунок 1 - Произвольная односвязная плоская область

Далее будем использовать приведенную геометрическую жесткость сечений $i_k = I_k/A^2$. В этом случае выражение (2) преобразуется к виду:

$$i_k > 1,065/K_f. \quad (4)$$

Это неравенство для квадратного сечения дает погрешность 5,33%, а для вытянутых прямоугольников – намного больше. Поэтому можно внести поправку в представленное решение, обратив неравенства (2) и (4) в равенства для квадратного сечения:

$$I_k \geq 1,1248 \frac{A^2}{K_f} \text{ и } i_k \geq \frac{1,1248}{K_f}. \quad (5)$$

Решения, полученные по формуле (1) для различных прямоугольных сечений, приведены в таблице 1 (колонка 2, табл. 1). По этим данным построена аппроксимирующая функция с аргументом $1/K_f$ –

$$i_k = 0,006027 + 1,07659/K_f, \quad (6)$$

с помощью которой получены результаты, приведенные в колонке 5. Эти результаты отличаются от точного решения в пределах двух процентов для прямоугольных сечений, удовлетворяющих условию $1 \leq a/b \leq 8$ (см. колонка 6, табл. 1).

Таблица 1 - Анализ геометрической жесткости кручения прямоугольных сечений

a/b	i_k по (1)	K_f	$1/K_f$	i_k по (5)	$\Delta, \%$	\dot{r}/\bar{r}	i_k по (4)	$\Delta, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,0	0,1406	8,000	0,1250	0,1406	0	0,9139	0,1406	0
1,2	0,1384	8,133	0,1230	0,1384	0	0,8968	0,1379	0,36
1,5	0,1307	8,667	0,1154	0,1303	0,31	0,8363	0,1286	0,84
2,0	0,1144	10,000	0,1000	0,1137	0,61	0,7222	0,1111	2,88
2,5	0,0998	11,600	0,0862	0,0988	1,00	0,6281	0,0966	3,21
3,0	0,0878	13,333	0,0750	0,0868	1,14	0,5544	0,0853	2,85
3,5	0,0781	15,143	0,0660	0,0771	1,28	0,4965	0,0764	2,18
4,0	0,0703	17,000	0,0588	0,0684	1,14	0,4498	0,0692	1,56
4,5	0,0637	18,889	0,0529	0,0630	1,10	0,4112	0,0632	0,78
5,0	0,0583	20,800	0,0481	0,0578	0,86	0,3788	0,0583	0
6,0	0,0497	24,667	0,0405	0,0497	0	0,3277	0,0504	1,41
8,0	0,0384	32,500	0,0308	0,0393	2,08	0,2585	0,0398	3,65
10,0	0,0312	40,400	0,0248	0,0327	4,81	0,2137	0,0329	5,45
∞	0	∞	∞		–	0	0	–

В математической физике [9] приводятся исследования геометрической жесткости кручения сечений с применением конформного отображения. При этом использовались внутренний и внешний конформные радиусы. Однако функциональная зависимость геометрической жесткости сечений от отношения конформных радиусов (внутреннего \dot{r} к внешнему \bar{r}) осталось авторами незамеченной. Нами установлена эта зависимость с помощью численного эксперимента.

В статье [10] авторами предложены формулы для определения внутреннего и внешнего конформных радиусов для прямоугольников. Внутренний конформный радиус определяется по формуле:

$$\dot{r} = \frac{2}{\pi} b \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} q^{n^2} \right)^{-2}, \quad (7)$$

где a и b – стороны прямоугольника ($a \geq b$); $q = e^{-\pi a/b}$.

Для подсчета значений внешнего конформного радиуса, необходимо решить систему разрешающих уравнений Э.Б. Кристоффеля – Г.А. Шварца:

$$\begin{cases} \frac{a}{\bar{r}} = \pi \cos^2 \alpha \sum_{k=0}^{\infty} \frac{((2k-1)!!)^2}{2^{2k} (k+1)! k!} \cos^{2k} \alpha \\ \frac{b}{\bar{r}} = \pi \sin^2 \alpha \sum_{k=0}^{\infty} \frac{((2k-1)!!)^2}{2^{2k} (k+1)! k!} \sin^{2k} \alpha \end{cases} \quad (8)$$

относительно \bar{r} и α , где α – аргумент комплексных чисел (точек окружности, образами которых при конформном отображении служат вершины прямоугольника, при этом, центр прямоугольника совпадает с началом координат, а стороны параллельны координатным осям; принято также $(-1)!! = 1$). После проведения вычислений по формулам (7) и (8) получены отношения \dot{r}/\bar{r} , которые представлены в таблице 1 (колонка 7). С учетом этих результатов в работе [11] построена аппроксимирующая функция для определения этого отношения для любых прямоугольников:

$$\dot{r}/\bar{r} = \frac{g + c\lambda + e\lambda^2}{1 + b\lambda + d\lambda^2 + f\lambda^3}, \quad (9)$$

где $\lambda = a/b$; $g = 0,80307$; $b = -0,76171$; $c = -0,92186$; $d = 0,49197$; $e = 1,243$; $f = 0,49981$. Погрешность этой функции не превышает 0,04%.

При использовании в качестве аргумента отношения конформных радиусов построена аппроксимирующая функция

$$i_k = 0,1538 \cdot \dot{r}/\bar{r}, \quad (10)$$

с помощью которой получены результаты, приведенные в колонке 8 таблицы 1. Эти результаты отличаются от точного решения в пределах (3, ..., 3,5)% для прямоугольных сечений, удовлетворяющих условию $1 \leq a/b \leq 8$ (см. колонка 9, табл. 1).

Выражение (6) является линейной зависимостью i_k от аргумента $1/K_\beta$, а выражение (10) представляет собой прямую пропорциональность i_k от аргумента \dot{r}/\bar{r} . Ввиду очевидной простоты последнее выражение предпочтительнее, несмотря на то, что с его помощью получаемые решения имеют несколько большую погрешность.

Выводы

1. Точное решение задачи об определении приведенной геометрической жесткости кручения стержней с прямоугольным сечением представлено в зависимости от интегральной геометрической характеристики сечения – коэффициента формы. Получены численные значения приведенной геометрической жесткости сечений в виде прямоугольников с различны-

ми отношениями сторон. Аппроксимирующая функция $i_k - 1/K_f$ представлена линейной зависимостью (6) от аргумента $1/K_f$. Результаты, получаемые с использованием этой зависимости отличаются от точных решений в пределах двух процентов для прямоугольных сечений, удовлетворяющих условию $1 \leq a/b \leq 8$.

2. По этим же значениям приведенной геометрической жесткости прямоугольных сечений построена аппроксимирующая функция (10) с использованием геометрического аргумента – отношения конформных радиусов (внутреннего к внешнему). Эта аппроксимирующая функция представлена также линейной зависимостью, проходящей через начало координат (прямая пропорциональность). Расчеты, проведенные с её использованием, показали, что погрешность получаемых результатов в диапазоне $a/b < 6$ не превышает 3,2%. Несмотря на довольно высокую погрешность, зависимость (10) предпочтительнее, поскольку представляет решение сложной физической задачи элементарной формулой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арутюнян Н.Х., Абрамян В.Л. Кручение упругих тел. М.: Физматгиз, 1963. 686 с.
2. Коробко В.И. Изопериметрический метод в строительной механике: Теоретические основы изопериметрического метода. М.: Издательство АСВ, 1997. 390 с.
3. Коробко А.В. Геометрическое моделирование формой области в двумерных задачах теории упругости. М.: Издательство АСВ, 1999. 302 с.
4. Коробко В.И., Малых С.Г. Графическое представление границ изменения геометрической жесткости сечений в виде выпуклых фигур // Известия вузов. Машиностроение. 1986. №3. С. 2-7.
5. Korobko V.I., Korobko A.V., Savin S.Y., Chernyaev A.A. Isoperimetric Properties of the Torsion Rigidity of Convex Section // Procedia Engineering, International on Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016. pp 1648-1656.
6. Коробко В.И., Хусточкин А.Н. Изопериметрический метод в задачах устойчивости пластинок. Ростов-на-Дону: Изд-во Северо-Кавказского научного центра высшей школы, 1994. 144 с.
7. Черняев А.А. Динамический расчет правильных n-угольных, треугольных и ромбических шарнирно опертых пластинок с использованием отношения конформных радиусов в качестве геометрического аргумента // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2012. № 2. С. 63-71.
8. Черняев А.А. Геометрическое моделирование пластинчатых конструкций из условия жесткости // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2012. V. 8. Issue 4. P. 66-77.
9. Поля Г., Сёге Г. Изопериметрические неравенства в математической физике. М.: КомКнига, 2006. 336 с.
10. Казанцев В.П. Золотов О.А, Долгополова М.В. Электростатика на плоскости. Нормировка потенциала. Емкости уединенного проводника и линии относительно точки. Конформные радиусы // Вестник КрасГУ. Физико-математические науки. 2005. №1. С. 32-38.
11. Коробко В.И., Черняев А.А. Определение максимального прогиба прямоугольных пластинок с комбинационными граничными условиями с использованием отношения конформных радиусов // Строительство и реконструкция. 2011. № 6. С.24-29.

REFERENCES

1. Arutyunyan N.KH., Abramyan V.L. Krucheniye uprugikh tel [Torsion of elastic bodies]. Moscow: Fizmatgiz, 1963. 686 p.
2. Korobko V.I. Izoperimetricheskiiy metod v stroitel'noy mekhanike: Teoreticheskiye osnovy izoperimetricheskogo metoda [Isoperimetric method in structural mechanics: Theoretical foundations of the isoperimetric method]. Moscow: Izdatel'stvo ASV, 1997. 390 p.
3. Korobko A.V. Geometricheskoye modelirovaniye formoy oblasti v dvumernykh zadachakh teorii uprugosti [Geometric modeling by the shape of a region in two-dimensional problems of the theory of elasticity]. Moscow: Izdatel'stvo ASV, 1999. 302 p.
4. Korobko V.I., Malykh S.G. Graficheskoye predstavleniye granits izmeneniya geometricheskoy zhestkosti se-cheniy v vide vypuklykh figure [A graphic representation of the boundaries of the change in the geometric stiffness of sections in the form of convex figures]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroyeniye*. 1986. No 3. Pp. 2-7.
5. Korobko V.I., Korobko A.V., Savin S.Y., Chernyaev A.A. Isoperimetric Properties of the Torsion Rigidity of Convex Section. *Procedia Engineering, International on Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016*. pp 1648-1656.
6. Korobko V.I., Khustochkin A.N. Izoperimetricheskiiy metod v zadachakh ustoychivosti plastinok [Isoperimetric method in problems of plate stability]. Rostov-na-Donu: Izd-vo Severo-Kavkazskogo nauchnogo tsentra vysshey

shkoly, 1994. 144 p.

7. Chernyayev A.A. Dinamicheskiy raschet pravil'nykh n-ugol'nykh, treugol'nykh i rombicheskikh sharnirno opertykh plastinok s ispol'zovaniyem otnosheniya konformnykh radiusov v kachestve geometricheskogo argumenta [Dynamic calculation of regular n-coal, triangular and rhombic articulated supports using the ratio of conformal radii as a geometric argument]. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy. 2012. No 2. Pp. 63-71.

8. Chernyayev A.A. Geometricheskoye modelirovaniye platinchatykh konstruksiy iz usloviya zhestkosti [Geometric modeling of plate constructions from stiffness conditions]. Inter-national Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2012. V. 8. Issue 4. P. 66-77.

9. Polia G., Soge G. Izoperimetricheskiye neravenstva v matematicheskoy fizike [Isoperimetric inequalities in mathematical physics]. Moscow: KomKniga, 2006. 336 p.

10. Kazantsev V.P. Zolotov O.A, Dolgoplova M.V. Elektrostatika na ploskosti. Normirovka potentsiala. Yemkosti uyedinennogo provodnika i linii otnositel'no tochki. Konformnyye radius [Electrostatics on the plane. Normalization of potential. Capacities of a solitary conductor and line relative to a point. Conformal radii]. Vestnik Kras-GU. Fiziko-matematicheskoye nauki. 2005. No 1. P. 32-38.

11. Korobko V.I., Chernyayev A.A. Opredeleniye maksimal'nogo progiba pryamougol'nykh plastinok s kombinirovannymi granichnymi usloviyami s ispol'zovaniyem otnosheniya konformnykh radiusov [Determination of the maximum deflection of rectangular plates with combined boundary conditions using the ratio of conformal radii]. Stroitel'stvo i rekonstruksiya. 2011. No 6. Pp. 24-29.

Информация об авторах

Коробко Андрей Викторович

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», Орёл, Россия,
доктор технических наук, профессор кафедры мехатроники, механики и робототехники.
E-mail: ankor.66@mail.ru

Калашникова Наталья Григорьевна

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», Орёл, Россия,
доктор технических наук, профессор кафедры мехатроники, механики и робототехники.
E-mail: naka.61@mail.ru

Information about authors

Andrey Korobko V.

Orel state University named after I.S. Turgeneva, Orel, Russia,
doctor of technical Sciences, Professor of the Department of mechatronics, mechanics and robotics.
E-mail: ankor.66@mail.ru

Kalashnikova Natalia G.

Orel state University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia,
doctor of technical Sciences, Professor of the Department of mechatronics, mechanics and robotics.
E-mail: naka.61@mail.ru

С.Н. КРИВОШАПКО¹¹ФГБОУ ВО «Российский университет дружбы народов (РУДН)», г. Москва, Россия

ОБОЛОЧКИ И СТЕРЖНЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В ФОРМЕ АНАЛИТИЧЕСКИ НЕЗАДАВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В СОВРЕМЕННОЙ АРХИТЕКТУРЕ

Аннотация. В XXI веке практически во всех странах появляются сооружения в форме аналитически задаваемых поверхностей. Возникла архитектура произвольных форм. Архитекторы использовали весь свой арсенал аналитических поверхностей, пригодный для воплощения их творческих концепций. Как показали исследования, проведенные в РУДН, в настоящее время нашли применение только 43 аналитические поверхности из 600 известных. Но многие известные и молодые архитекторы и конструкторы перешли к применению поверхностей, которые нельзя задать аналитически. Их замыслы воплотились во многих гражданских, общественных и промышленных сооружениях и стали архитектурными достопримечательностями городов и стран, наряду с сооружениями, построенными раньше в форме канонических поверхностей. В статье приводятся примеры наиболее интересных зданий, дается классификация оболочек и пространственных структур свободных форм в зависимости от их расчетных схем, материала и конструктивных решений. Цель настоящего исследования – выяснить степень вовлеченности архитекторов, геометров и инженеров-расчетчиков в разработку и строительство оболочек и стержневых структур в форме аналитически задаваемых поверхностей.

Ключевые слова: архитектура произвольных форм, оболочка свободной формы, стержневые пространственные структуры, аналитически неопределимые поверхности, 3D печатный дом произвольной формы.

S.N. KRIVOSHAPKO¹¹Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

SHELLS AND ROD STRUCTURES IN THE FORM OF ANALYTICALLY NON-GIVEN SURFACES IN MODERN ARCHITECTURE

Abstract. In the XXIth century practically in all countries, erections in the form of analytically non-given surfaces are appeared. Architecture of arbitrary shapes was springing up. Architects used their entire arsenal of analytical surfaces suitable for realization of their creative ideas. The investigations carried out in RUDN showed that only 43 analytical surfaces from 600 known surfaces found the application in the World at present time. But many noted and young architects and designers began to use surfaces that are impossible to give by analytical formulas. Their intentions were realized into many civil, public, and industrial erections and they came to be as the architectural sights of the towns and countries equally with the erections built before in the form of canonical surfaces. In a paper, the examples of the most interesting buildings are presented; the classification of shells and shell spatial structures of free forms is given according to their analysis schemes, material, and structural solutions. The aim of presented research is to elucidate an extent of involving of architects, geometricians, and designers into working up and building of shells and rod structures in the form of analytically non-given surfaces.

Keywords: free form architecture, a shell of arbitrary form, rod spatial structure, analytically non-given surface, a 3D print building of arbitrary form.

1. Введение

Несмотря на то, что в научно-технической литературе описаны множество примеров применения тонких оболочек в форме канонических поверхностей, таких как параболоид вращения [1], однополостный гиперболоид вращения [2], коноид [1, 3], эллипсоид вращения [1], эллиптический параболоид [4], конические поверхности [5] и др., архитекторы всё боль-

ше применяют тонкостенные и стальные однослойные сетчатые оболочки в форме аналитически задаваемых поверхностей. Этому способствует широкое распространение численных методов задания поверхностей и развитие численных методов расчета оболочек с помощью МКЭ. В этих случаях требуется задание срединных поверхностей оболочек с помощью реперных точек в отличие от аналитического задания поверхностей [6].

А.Л. Гольденвейзер [7] и С.Н. Кривошапко [8] предложили для применения системы расчетных уравнений, включающие в себя уравнения равновесия, физические и геометрические уравнения в неортогональных криволинейных координатах, которые можно использовать, если срединная поверхность оболочки задана не в линиях кривизн. Эти системы для оболочек в линиях кривизн становятся тождественными. Однако расчетные уравнения для оболочек с аналитическими срединными поверхностями, заданными в неортогональных криволинейных координатах, были применены только для расчета прямых [9] и развертывающихся [10] геликоидов.

Круг оболочек, заданных в линиях кривизн, для которых получены аналитические решения для определения параметров напряженно-деформированного состояния, намного шире.

2. Цель исследования

В области расчета, проектирования и возведения оболочек простой канонической формы накоплен большой опыт, но эти оболочки уже не могут удовлетворить всех потребностей общества. Строительство зданий и сооружений с большими пролетами или сложной геометрической формы – показатель высокого уровня достижений строительной науки [11]. Цель настоящего исследования – выяснить степень вовлеченности архитекторов, геометров и инженеров-расчетчиков в разработку и строительство оболочек и стержневых структур в форме аналитически задаваемых поверхностей.

3. Примеры оболочек и стержневых структур в современной архитектуре произвольной формы

3.1. Пространственные стержневые структуры в форме аналитически задаваемых поверхностей и заполнением треугольными и четырехугольными панелями

Эти конструкции, хотя и очень похожи на оболочки, с точки зрения строительной механики ими не являются. Если пространство между стержнями заполняется плоскими или изогнутыми панелями, не воспринимающими внешнюю нагрузку, действующую вне области самих панелей, то эту конструкцию необходимо рассчитывать, как пространственную стержневую структуру (рисунок 1).

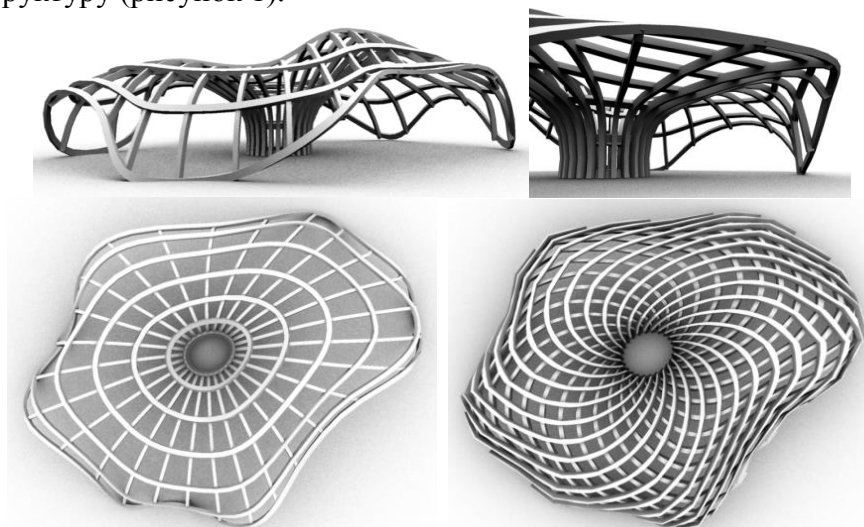


Рисунок 1 – Эскизы металлических стержневых структур



Рисунок 2 - Покрытие из стали и стекла над двумя зданиями гостиницы, Абу-Даби (ОАЭ)

Общее покрытие из стали и стекла двух отдельно стоящих зданий гостиницы YasMarina в Абу-Даби, ОАЭ (рисунок 2) наглядно подтверждает преимущество стальных конструкций перед железобетонными при определенных архитектурных решениях пространственных композиций. Здесь покрытие опирается на 10 V-образных колонн, а горизонтальные воздействия воспринимаются подкосами, установленными на уровне перекрытий гостиных. Покрытие содержит более 5000 соединений. Гладкая поверхность оболочки аппроксимирована плоскими прямоугольными элементами, что облегчило остекление оболочки, причем эти элементы крепятся к неплоской решетке оболочки, чем обеспечивается устойчивость к динамическому воздействию ветра. V-образные колонны диаметром от 508 до 914 мм и толщиной 30 или 40 мм и контурная балка диаметром 559 мм и толщиной от 14 до 70 мм имеют трубчатое поперечное сечение, а элементы решетки выполнены из горячекатаного прямоугольного полового стального проката 100×250 мм с толщиной стенки от 7 до 40 мм [12].



Рисунок 3 - Торговый центр «Золотые террасы», Варшава, Польша

Покрытие торгового центра в Варшаве аппроксимировано треугольными элементами. Архитектурные решения разрабатывались компанией Jerde Partnership International (рисунок 3). Треугольные панели более точно аппроксимируют гладкую поверхность покрытия. Здание возведено в 1998 году.

«Стеклянная кора» — крупнейшая в мире светопрозрачная конструкция, созданная российскими проектировщиками и строителями по концепции британских инженеров из компании «Vigo Harrold» (рисунок 4а). Покрытие «Стеклянной коры» представляет собой однослойную сетчатую оболочку свободной формы, состоящую из более 1300 узловых элементов, более 8000 балок, 106 опор-колонн и более 2400 стеклопакетов с индивидуальными

размерами. Площадь покрытия из металлического каркаса и стеклянных треугольников (рисунки 4б) – 8700 м².

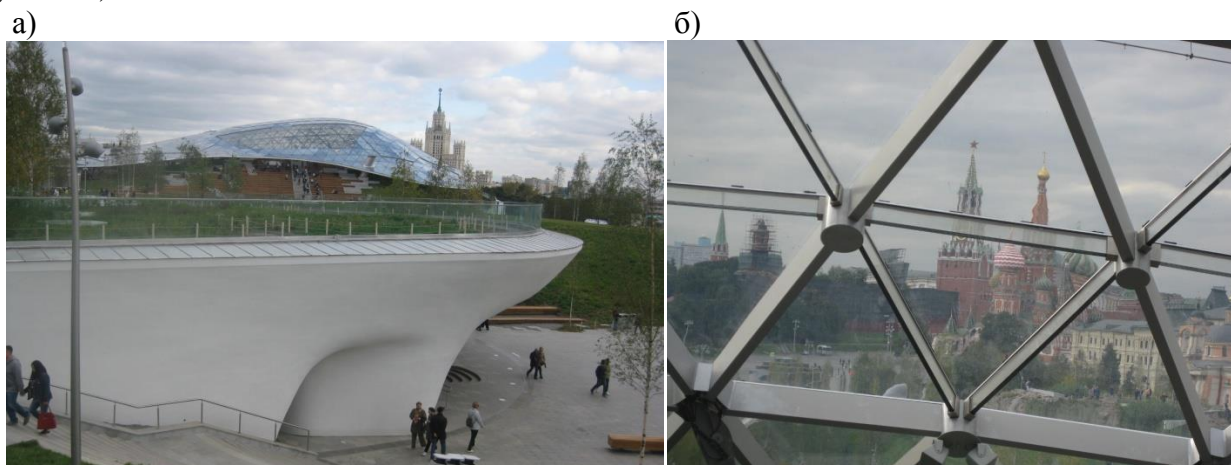


Рисунок 4 - «Стеклянная кора», г. Москва: а) общий вид; б) фрагмент оболочки покрытия

Авторы расчетной модели стальной однослойной сетчатой оболочки: Ю. Лунев, А. Морозов, ООО «Несущие системы», г. Новосибирск. Конечно-элементная модель сетчатой оболочки включает в себя несущие металлические элементы каркаса с учетом наклонных сварных колонн переменного сечения. В расчётной модели учтены стеклянные балки «Окна». Стеклянные панели покрытия стальных конструкций сетчатой оболочки смоделированы оболочечными конечными элементами. Здание концертного зала «Стеклянная кора» встроено в состав парка «Зарядье», Москва [<https://www.liraland.ru/lira/projects/3366/>].

3.2. Железобетонные оболочки в современной архитектуре произвольной формы

Ярким представителем этого вида оболочек является здание Музея современного искусства в Каглиари, Италия (Nuragicand Contemporary Art Museum, Cagliari, Italy), проект которого был разработан архитектурным бюро Zaha Hadid Architects под руководством знаменитого архитектора ЗахаХадид (рисунок 5).



Рисунок 5 - Музей современного искусства в Каглиари, Италия

Новый урбанистический культурный центр в Мускате (New Cultural Center in Muscat), Оман, включает в себя Национальный архив, Национальную библиотеку и Оманский национальный театр (рисунок 6).

Комплекс был запроектирован архитектурным бюро Architecture-Studio Architects, Paris. Хотя в технической литературе покрытие центра называют «арабским зонтиком» («musharabiehсарону»), по-видимому, форма покрытия очень близка к велароидальной поверхности.

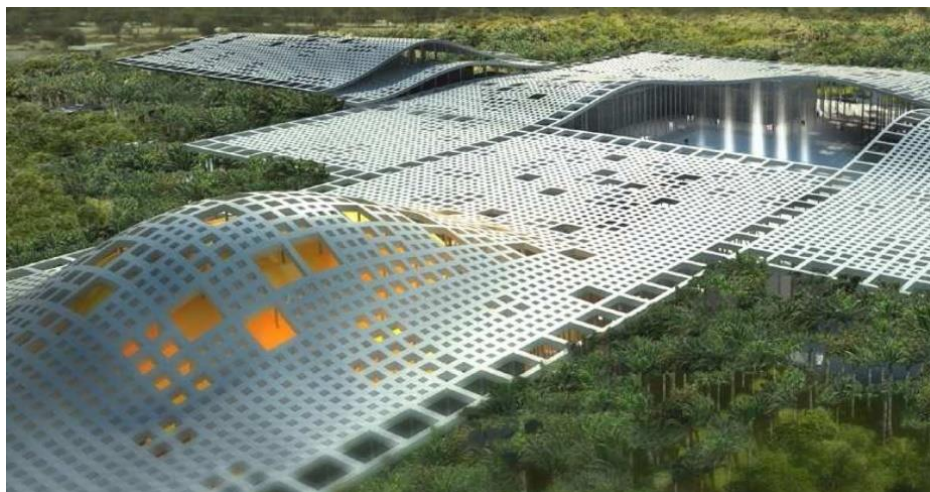


Рисунок 6 - Новый культурный центр в Маскате, Оман

Компания WATG Urban Architecture (Чикаго, США) запроектировала первый в мире 3D-печатный дом произвольной формы (рисунок 7).

Проект получил первый приз на конкурсе FreeformHomeDesignChallenge и будет построен в г. Чаттануге (штат Теннесси).

В качестве примера железобетонной оболочки свободной формы можно привести также одно из сооружений «Города искусства и науки», Испания, г. Валенсия.

С. Калатрава запроектировал свое сооружение из фрагментов сферических поверхностей (рисунок 8).



Рисунок 7 - Первый в мире 3D-печатный дом произвольной формы



Рисунок 8 - Дворец искусств королевы Софии, г. Валенсия, Испания

Небольшая часть приведённых в этом разделе примеров зданий свободной формы из железобетона показывает, что этот материал активно применяется для осуществления творческих замыслов архитекторов, работающих с тонкостенными оболочками, срединные поверхности которых невозможно задать аналитическими формулами.

3.3. Оболочки свободной формы с несущими конструкциями, формирующими треугольную или четырехугольную структуру и сплошным покрытием (настилом)

Ярким примером удачного использования природного ландшафта для производственных зданий является ликеро-водочный завод Macallan, построенный в Шотландии, Англия, в 2018 году.

Проект разработан компанией RogerStirkHarbour&Partners. Весь комплекс находится под деревянной крышей, покрытой дерном (рисунок 9а). Несущие деревянные балки из кле-

енного бруса формируют сетку 3×3 м, а сверху укладывается деревянный настил (рисунок 9б). Сооружение уже представлено для участия в Международном архитектурном конкурсе.

а)



б)



*Рисунок 9 - Ликеро-водочный завод Macallan, Шотландия, Англия:
а) общий вид, б) вид изнутри на конструкцию покрытия*

Несущий стальной каркас Московского молодежного центра «Планета КВН» обертывается двумя полотнищами из перфорированного алюминиевого листа, уложенных на направляющие, которые расположены с одинаковым шагом 1,5 м (рисунок 10). Реконструкция кинотеатра, на основе которого архитектурной компанией «Атриум» запроектирован Молодежный центр, отмечена первым местом на открытом архитектурном конкурсе Архновация 2013. Центр стал архитектурной доминантой района.

Проект павильона Люксембурга на выставке ЭКСПО-2020, представленный студией МЕТАФОРМ («METAFORMarchitecturestudio»), будет реализован в Дубае, ОАЭ. Габариты павильона: ширина – 50 м, длина – 38 м, высота – 21 м. Форма павильона будет похожа на ленту Мёбиуса (рисунок 11).

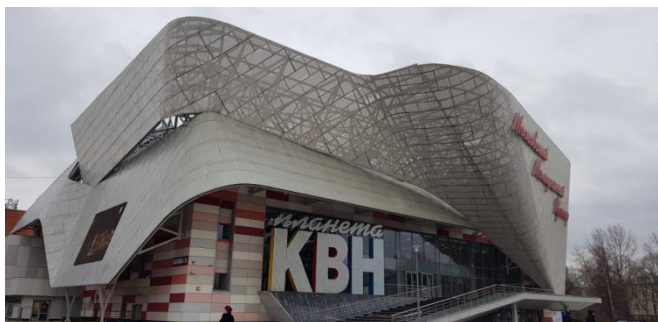


Рисунок 10 - Московский молодежный центр



Рисунок 11 - Проект павильона Люксембурга на ЭКСПО -2020 [www.luxembourgexpo2020dubai.iu]

Стальная конструкция будет формировать четырехугольную структуру, которая затем будет покрываться огнестойким стекловолокном. По-видимому, поверхность сооружения будет аппроксимироваться системой конусов, чтобы не было разрывов и складок стекловолокна. Стальная структура и полотно после выставки будет демонтирована и использоваться в другом месте

3.4. Здания с фасадами, образованными параболическим изгибанием листового материала

Параболическим изгибанием листового материала можно получить любую торсовую поверхность. Параболическое изгибание – изгибание, производимое без разрывов и складок

исходного плоского листа. Используя это свойство, архитекторы получают интересные наружные фасады сооружений в архитектурном стиле деконструктивизма и экспрессионизма. В первую очередь внешний вид здания должен привлекать внимание прохожих, что наиболее удачно было достигнуто в двух сооружениях: концертный зал Уолта Диснея в Лос-Анжелесе (Walt Disney Concert Hall), США (рисунок 12), и музей современного искусства в Херфорде (MARTa Museum), Германия (рисунок 13).



Рисунок 12 - Концертный зал Уолта Диснея в Лос-Анжелесе, США



Рисунок 13 - Музей современного искусства в Херфорде, Германия

Оба сооружения были запроектированы архитектором Фрэнком Гери (Frank Gehry). Мнения об архитектуре Ф. Гери традиционно противоречивы, но любой хоть раз увидевший его сооружения не забудет их никогда. Концертный зал Уолта Диснея в Лос-Анжелесе (США) открыт в 2003 году, а музей современного искусства в Херфорде (Германия) – в 2005 году. Причем музей современного искусства в Херфорде был признан лучшим музеем Германии в 2014 году. Геометрическое моделирование покрытия было выполнено Дж. Маерттерером (JessMaertterer).

Здания с фасадами или с покрытиями, образованными параболическим изгибанием листового материала в настоящее время встречаются редко, так как немногие архитекторы и конструкторы берутся за их реализацию, хотя можно с уверенностью сказать, что эти формы могут быть только торсовыми поверхностями.

4. Примеры из бионической архитектуры



Рисунок 14 - Коттедж «Глаза», г. Сестрорецк

Бионическая архитектура разрабатывает сооружения, которые вписываются в природную среду, образуя продолжение её естественного развития. Архитектурная бионика пытается избежать в строительстве домов однообразных прямых линий с гладкими стенами и старается превратить их в некий пейзаж с отсутствием угловых секций.

Одним из примеров бионической архитектуры в России можно назвать коттедж «Глаза», построенный в городе Сестрорецке архитектором Б. Левинзоном (рисунок 14).

Считается, что необычные формы, отсутствие прямых линий, стены и крыша в виде произвольных поверхностей визуально дополняют местность, на которой выстроен дом.

Хорошо известен проект плавучего города «Кувшинка», предложенный архитектурным бюро Винсента Каллебо (Vincent Callebaut), жилой коттедж «Дом-улитка», построенный по проекту Х. Сеносиана в г. Мехико.

Множество сооружений, построенных в стиле бионической архитектуры, формируется аналитически задаваемыми поверхностями.

5. Предложенные классификации оболочек и пространственных структур свободных форм

Для оболочек свободной формы из стальных конструкций предложена следующая классификация [13]: 1) оболочка, аппроксимированная треугольными панелями, 2) оболочка, аппроксимированная четырехугольными панелями, 3) несущие конструкции формируют треугольную или четырехугольную структуру, 4) оболочки из изогнутых панелей.

Три точки в пространстве лежат в одной плоскости, поэтому треугольные панели проще применить вместо четырехугольных. Но зато у последних – меньше элементов на узел, меньше элементов на единицу площади поверхности, более легкая конструкция. Изогнутые панели используются, несмотря на то, что они дороже других вариантов, но часто это связано с художественными причинами и качеством конечной поверхности, т.к. не будут видны разрывы и перегибы поверхности. Если запроектировать оболочку свободной формы в виде торсовой поверхности, то эту оболочку можно получить параболическим изгибанием плоского листа. Другие поверхности получаются методом горячего изгиба с использованием пресс-форм. Изогнутые панели можно использовать как опалубку для тонкостенных железобетонных оболочек.

Предложенное выше в разделах 3 и 4 разделение оболочек и пространственных структур тоже можно считать, как их классификация.

6. Обзор научных работ по геометрии и расчету оболочек в форме аналитически задаваемых поверхностей

В работе [13] отмечается, что взаимодействие геометрии с архитектурой произвольной формы дало ускоренное развитие некоторым разделам дискретной дифференциальной геометрии. Однако уникальные решения некоторых математических задач на практике могут быть неприемлемы.

Существует много компьютерных программ, которые помогают в создании неканонических форм сооружений путем деформации известных поверхностей. Геометры предложили несколько видов поверхностей, которые можно принять за поверхности, задаваемые аналитическими уравнениями: поверхности Кунса, поверхности с образующими в плоскостях пучка в сферической системе координат, эвольвентные линейчатые поверхности, линейчатые поверхности с опорными точками на прямой линии и др. Много таких поверхностей описано в работе [14].

Обзор современного состояния теории оболочек сложной геометрии и оболочек в форме аналитически неопределимых поверхностей представлен в статье [15] с. 42 наименованиями использованной литературы. Здесь отмечается, что вначале оболочки, спроектированные на основе аналитического расчета и применяемые в реальных конструкциях, относились, с геометрической точки зрения, к ограниченному числу поверхностей. Затем с развитием численных методов расчета и усовершенствования ЭВМ стало возможным получение уточненных решений сложных задач теории оболочек. В статье [15] рассмотрены геометрические и прочностные исследования тонких гладких оболочек сложной формы, но составные и складчатые оболочки не рассматривались.

Методы расчета, разработанные для оболочек с аналитически определенными поверхностями, не могут быть применены непосредственно для оболочек в форме аналитически задаваемых поверхностей. Только численные методы могут привести к решению задачи.

6. Выводы

Э.З. Жуковский с коллегами [16] отмечал четкую тенденцию в мировой практике, заключающуюся в применении пространственных конструкций свободной формы, которые дают выразительные образы, принятые в современном обществе и решающие функциональные задачи. Приведенные в разделе 3 примеры подтверждают этот вывод.

П.Г. Еремеев [17] указывал, что «Проектирование должно быть четко организовано с учетом строгого контроля и приемки, минимизации человеческих ошибок. Расчетная схема должна быть максимально приближена к натурной конструкции. Расчет следует выполнять с учетом физической и геометрической нелинейности как единой пространственной системы, включающей фундаменты, каркас, большепролетное покрытие. Для повышения надежности результатов расчеты рекомендуется проводить с использованием современной вычислительной техники с применением различных программ. Следует иметь в виду, что использование компьютера имеет и обратную сторону – растет риск ошибок. Необходимо ясно понимать работу сооружения, основываясь на правилах строительной механики».

Изучение построенных оболочек и стержневых структур в форме аналитически задаваемых поверхностей в современной архитектуре показывает, что некоторые известные архитекторы и архитектурные компании довольно активно участвуют в проектировании этих сооружений. Практически все указанные в статье здания и сооружения получили Международные архитектурные премии и стали архитектурными доминантами городов, где они построены. Молодые талантливые архитекторы и студенты архитектурных специальностей вузов [18] часто выбирают в качестве тем своих разработок и дипломных проектов комплексы в форме аналитически задаваемых поверхностей. По-видимому, формообразование большепролетных тонкостенных оболочек, очерченных по каноническим поверхностям, себя исчерпало, любое новое сооружение будет повторением уже построенных аналогов. Проявить свои творческие концепции можно, в основном, используя арсенал новых оболочек и стержневых структур в форме аналитически задаваемых поверхностей. Хотя ряд известных архитекторов не согласен с этим выводом. Например, Р.Б. Фуллер так отзывался о своих архитектурных творениях: «Пусть архитекторы заливают об эстетику, заставляющей толпы богачей падать к их ногам. Я предпочту Купол, где стрессы и напряжения уходят прочь» [19].

Исследования, проведенные в Российском университете дружбы народов, показали, что из 600 предложенных геометрами поверхностей в строительстве использовались только 43 аналитические поверхности [20], причем в Москве только 18 поверхностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. KasicSonja. GeometrijskePovršiuArhitekturi. – Gradevinsko-arhitektonskifakultetUniverzitetuNišu, 2012. 238 p.
2. Кривошапко С.Н., Мамиева И.А. Стержневые системы в форме однополостного гиперboloида вращения // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2011. № 11. С. 19-23.
3. Das S.H., Chakravorty D. Bending analysis of stiffened composite conoidal shell roofs through finite element application // Journal of composite materials. 2011. 45(5). Pp 525-542.
4. Krivoshapko S.N., G.L. GbaguidiAïssè. Geometry, static, vibration and buckling analysis and applications to thin elliptic paraboloid shells// The Open Construction and Building Technology Journal. 2016. 10(1). P. 576-602 [DOI: 10.2174/1874836801610010576].
5. Мамиева И.А., Разин А.Д. Знаковые пространственные сооружения в форме конических поверхностей // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 10. С. 5-11.
6. Романова В.А. Особенности изображения процесса образования поверхностей в системе САПР AutoCAD // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2012. № 4. С.3-5.
7. Гольденвейзер А.Л. Теория упругих тонких оболочек. – Москва: ГТТИ, 1953. 544 с.
8. Кривошапко С.Н. Два вида расчетных уравнений для оболочек в произвольных криволинейных координатах // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 1. С. 15-22.

9. Rynkovskaya M., Ivanov V. Analytical method to analyze right helicoid stress-strain// *Advanced Structured Materials*. 2019. Vol 92. Pp. 157-171.
10. Krivoshapko S.N. Static analysis of shells with developable middle surfaces// *Applied Mechanics Reviews*. Vol.51. No12, Part 1. December 1998. Pp. 731-746.
11. Кривошапко С.Н., Мамиева И.А. Выдающиеся пространственные сооружения последних 20 лет // *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 2012. № 12. С. 8-14.
12. Schober Hans, Justiz Stefan, Tamai Hiroki. Speed and grace// *Civil Engineering*. 2011. February. Pp. 54-59
13. Логунова М.В., Хадидан Мохамед Сейф-еддин, Буссаха Фетхи. Геометрические формы оболочек в архитектурном конструировании// *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017. № 08(62). Часть 1. С. 140-143.
14. Иванов В.Н., Романова В.А. Конструкционные формы пространственных конструкций. Визуализация поверхностей в системах MathCad, AutoCad. М.: Изд-во АСВ, 2016. 412 с.
15. Кривошапко С.Н. Обзор современного состояния теории оболочек сложной геометрии и оболочек в форме аналитически неопределимых поверхностей // *Монтажные и спец. работы в строительстве*. 1998. №5. С. 24-28.
16. Жуковский Э.З., Шилобреев Ю.А., Шевченко О.В. Большепролетные пространственные конструкции в мировой практике // *Строительная механика и расчет сооружений*. 1990. № 5. С. 87-91.
17. Еремеев П.Г. Металлические конструкции покрытий уникальных большепролетных сооружений // *Промышленное и гражданское строительство*. 2007. № 3.
18. Мамиева И.А. О подготовке специалистов по архитектуре, геометрии и расчету большепролетных пространственных структур и оболочек // *Строительство и реконструкция*. 2016. № 5 (67). С. 114-118.
19. Кривошапко С.Н. О возможностях оболочечных сооружений в современной архитектуре и строительстве// *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2013. № 1. С. 51-56.
20. Мамиева И.А. Аналитические поверхности для параметрической архитектуры в современных зданиях и сооружениях // *Academia. Архитектура и строительство*. 2020. № 1.

REFERENCES

1. Krasic Sonja. Geometrijske Površine Arhitekturi. Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta Niša, 2012. 238 p.
2. Krivoshapko S.N., Mamiyeva I.A. Sterzhnevyye sistemy v forme odnopolostnogo giperboloida vrashcheniya [Rod systems in the form of a one-sheet rotational hyperboloid]. *Montazhnyye i spetsial'nyye raboty v stroitel'stve*. 2011. No 11. P. 19-23.
3. Das S.H., Chakravorty D. Bending analysis of stiffened composite conoidal shell roofs through finite element application. *Journal of composite materials*. 2011. 45(5). Pp 525-542.
4. Krivoshapko S.N., G.L. Gbaguidi Aïssè. Geometry, static, vibration and buckling analysis and applications to thin elliptic paraboloid shells. *The Open Construction and Building Technology Journal*. 2016. 10(1). P. 576-602. DOI: 10.2174/1874836801610010576.
5. Mamiyeva I.A., Razin A.D. Znakovyye prostranstvennyye sooruzheniya v forme konicheskikh poverkhnostey [Sign spatial structures in the form of conical surfaces]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2017. No 10. P. 5-11.
6. Romanova V.A. Osobennosti izobrazheniya protsessa obrazovaniya poverkhnostey v sisteme SAPR AutoCAD [Features of the image of the surface formation process in the AutoCAD CAD system.] *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy*. 2012. No 4. P. 3-5.
7. Gol'denveyzer A.L. Teoriya uprugikh tonkikh obolochek [Theory of elastic thin shells]. Moscow: GTTI, 1953. 544 p.
8. Krivoshapko S.N. Dva vida raschetnykh uravneniy dlya obolochek v proizvol'nykh krivolineynykh koordinatakh [Two types of calculation equations for shells in arbitrary curvilinear coordinates]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy*. 2017. No 1. Pp. 15-22.
9. Rynkovskaya M., Ivanov V. Analytical method to analyze right helicoid stress-strain. *Advanced Structured Materials*. 2019. Vol 92. Pp. 157-171.
10. Krivoshapko S.N. Static analysis of shells with developable middle surfaces. *Applied Mechanics Reviews*. Vol.51. No12, Part 1. December 1998. Pp. 731-746.
11. Krivoshapko S.N., Mamiyeva I.A. Vydayushchiyesya prostranstvennyye sooruzheniya poslednikh 20 let [Outstanding spatial structures of the last 20 years]. *Montazhnyye i spetsial'nyye raboty v stroitel'stve*. 2012. No 12. Pp. 8-14.
12. Schober Hans, Justiz Stefan, Tamai Hiroki. Speed and grace. *Civil Engineering*. 2011. February. Pp. 54-59
13. Logunova M.V., Khadidan Mokhamed Seyf-yeddin, Bussakha Fetkhi. Geometricheskiye formy obolochek v arkhitekturnom konstruirovanii [Geometric forms of shells in architectural design]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2017. No 08(62). Part 1. Pp. 140-143.

14. Ivanov V.N., Romanova V.A. Konstruktsionnyye formy prostranstvennykh konstruktsiy. Vizualiza-tsiya poverkhnostey v sistemakh MathCad, AutoCad [Structural forms of spatial structures. Visualization of surfaces in MathCad, AutoCad systems]. Moscow: Izd-vo ASV, 2016. 412 p.
15. Krivoshapko S.N. Obzor sovremennogo sostoyaniya teorii obolochek slozhnoy geometrii i obolochek v forme analiticheski neopredelimykh poverkhnostey [A review of the current state of the theory of shells of complex geometry and shells in the form of analytically indefinable surfaces]. *Montazhnyye i spets. raboty v stroitel'stve*. 1998. No 5. Pp. 24-28.
16. Zhukovskiy E.Z., Shilobreyev YU.A., Shevchenko O.V. Bol'sheproletnyye prostranstvennyye konstruk-tsii v mirovoy praktike [Large-span spatial constructions in world practice]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 1990. No 5. Pp. 87-91.
17. Yeremeyev P.G. Metallicheskiye konstruktsii pokrytiy unikal'nykh bol'sheproletnykh sooruzheniy [Metal structures for coatings of unique wide-span structures]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2007. No 3.
18. Mamiyeva I.A. O podgotovke spetsialistov po arkhitekture, geometrii i raschetu bol'sheproletnykh pro-stranstvennykh struktur i obolochek [On the training of specialists in architecture, geometry and the calculation of large-span spatial structures and shells]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2016. No 5 (67). Pp. 114-118.
19. Krivoshapko S.N. O vozmozhnostyakh obolochechnykh sooruzheniy v sovremennoy arkhitekture i stroitel'stve [On the possibilities of shell structures in modern architecture and construction]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy*. 2013. No 1. Pp. 51-56.
20. Mamiyeva I.A. Analiticheskiye poverkhnosti dlya parametricheskoy arkhitektury v sovremennykh zdani-yakh i sooruzheniyakh [Analytical surfaces for parametric architecture in modern buildings and structures]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2020. No 1.

Информация об авторах

Кривошапко Сергей Николаевич

ФГБОУ ВО «Российский университет дружбы народов (РУДН)», г. Москва, Россия,
доктор технических наук, профессор, профессор департамента строительства Инженерной академии РУДН.
E-mail: sn.krivoshapko@mail.ru

Information about authors

Krivoshapko Sergey N.

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia,
Doctor in Technical Science, Professor, Professor of Department of Civil Engineering of Engineering Academia
E-mail: sn.krivoshapko@mail.ru

Е.В. ЛЕОНТЬЕВ¹¹ФАУ «Главгосэкспертиза России», г. Москва, Россия

ПОПЕРЕЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ БАЛКИ СО СВОБОДНЫМИ КРАЯМИНА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Аннотация. Известно, что в случае динамических воздействий важными динамическими характеристиками конструкций сооружения являются частоты и формы собственных колебаний, с которыми связана его реакция на динамическое воздействие. К числу таких конструкций, относятся конструкции, лежащие на грунте, которые можно рассматривать при их расчете как балки на упругом основании. Используя метод начальных параметров для балки со свободными краями, расположенной на упругом основании, решена задача по определению влияния присоединенной массы m_1 на круговую частоту собственных поперечных колебаний (без учета сил сопротивления), определены три первые частоты и формы собственных поперечных колебаний балки. Решена задача по определению усилий в балке с учетом собственного веса и динамической нагрузки (возмущающей силы) $F(t)$, с частотой вынужденных колебаний, соответствующей резонансной и межрезонансной зонам, приложенной в произвольной точке d .

Сформулированы условия, которые необходимо учитывать при анализе динамического поведения конструкции под действием переменных нагрузок в различных расчетных ситуациях.

Ключевые слова: грунтовое основание, балка на упругом основании, метод начальных параметров, свободные колебания, вынужденные колебания, динамический анализ.

E.V. LEONTIEV¹¹Main State Expertise of Russia, Moscow, Russia

TRANSVERSE VIBRATIONS OF A BEAM WITH FREE EDGES ON AN ELASTIC BASE UNDER DYNAMIC LOAD

Abstracts. It is known that in the case of dynamic influences, the important dynamic characteristics of the structures of a structure are the frequencies and forms of natural vibrations, with which its response to dynamic effects is associated. These structures include structures lying on the ground, which can be considered when calculating them as beams on an elastic foundation. Using the method of initial parameters for a beam with free edges located on an elastic base, the problem of determining the influence of the attached mass m_1 on the circular frequency of natural transverse vibrations (without taking into account the resistance forces) is solved, the first three frequencies and forms of natural transverse vibrations of the beam are determined. The problem of determining the efforts in the beam, taking into account its own weight and dynamic load (perturbing force) $F(t)$, with the frequency of forced vibrations corresponding to the resonance and interresonance zones applied at an arbitrary point d , was solved.

The conditions are formulated that must be taken into account when analyzing the dynamic behavior of a structure under the action of variable loads in various design situations.

Keywords: soil foundation, beam on an elastic foundation, initial parameter method, free vibrations, forced vibrations, dynamic analysis.

Введение

В настоящее время разработаны различные методы расчетов конструктивных систем совместно с основанием при статических, динамических и др. воздействиях в целях обеспечения надёжности и долговечности сооружений. Основная часть таких расчетных методов

апробирована на практике, широко освещена в научной литературе и регламентирована в соответствующих нормативных документах [1-3].

Существует большое количество готовых программных продуктов для решения статических и динамических задач в области строительства, позволяющих описывать напряженно-деформированное состояние (НДС) более приближенно к реальному и учитывать особенности распределения напряжений и деформирования на различных этапах нагружения.

Известно, что в случае динамических воздействий важными динамическими характеристиками конструкций сооружения являются частоты и формы собственных колебаний, с которыми связана его реакция на динамическое воздействие. К числу таких конструкций, относятся конструкции, лежащие на грунте, которые можно рассматривать при их расчете как балки на упругом основании.

Представляет интерес задача расчета и анализа собственных частот и форм поперечных колебаний балки со свободными краями, расположенной на упругом основании, в случае действия присоединенной массы m_1 и динамической нагрузки (возмущающей силы) $F(t)$, приложенной в произвольной точке d .

Модели и методы

Дифференциальное уравнение вынужденных поперечных колебаний балки постоянного сечения с учетом сил сопротивления при любом законе изменения возмущающей силы $q(x, t)$ имеет вид [9-11]:

$$EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \mu \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} + 2\alpha \frac{\partial^5 y(x,t)}{\partial x^4 \partial t} = q(x, t), \quad (1)$$

где E – модуль упругости материала балки; I – момент инерции поперечного сечения балки, $y(x)$ – поперечное перемещение оси балки в сечении x ; $q(x, t)$ – возмущающая нагрузка, изменяющаяся во времени t ; $\mu = q/g$; q — равномерно распределенная нагрузка (собственный вес и т. п.) на единицу длины балки; g — ускорение силы тяжести; α - коэффициент, характеризующий внутреннее трение материала.

Отметим, что в областях, удаленных от резонансных отношений частот, влияние затухания на амплитуды вынужденных колебаний незначительно, и в этих областях расчет можно производить без учета затухания [10-12].

Решение задачи выполнено в три этапа. На первом этапе определены собственные поперечные колебания балки с учетом собственного веса. На втором этапе определены собственные поперечные колебания балки с учетом собственного веса и присоединенной массой m_1 . На третьем этапе выполнено решение задачи с учетом возмущающей силы - вертикальной динамической нагрузки, которая изменяется во времени t по гармоническому закону $F(t) = F \sin \gamma t$ и приложена в произвольной точке d по длине балки.

Здесь: F – амплитудное значение возмущающей силы; γ - угловая частота изменения возмущающей силы.

При решении задачи использован метод начальных параметров.

Первый этап. Определим круговую частоту и формы собственных поперечных колебаний с учетом собственного веса балки (рисунок 1) со свободными краями длиной L изгибной жесткостью EI , расположенной на упругом основании Винклера с коэффициентом жесткости r_0 .

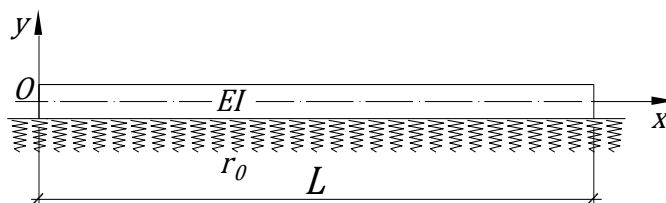


Рисунок 1 - Балка со свободными краями на упругом основании

Определение частоты и форм собственных поперечных колебаний балки выполним без учета сил сопротивления. При выполнении расчета балки будем учитывать в ней лишь деформацию изгиба.

Собственные поперечные колебания балки постоянного сечения с равномерно распределенной нагрузкой $q = \mu g$ при отсутствии сил сопротивления описываются дифференциальным уравнением:

$$EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \mu \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = 0, \quad (2)$$

Уравнение статического изгиба балки на упругом основании в соответствии с гипотезой Винклера (1867) имеет вид [4-6]:

$$EI y^{IV}(x) = -ry(x) + q(x). \quad (3)$$

где $r(x) = r_0 b y(x)$, а $r(x)$ - изменяющаяся по длине балки интенсивность реакции упругого основания; r_0 - коэффициент отпора основания или коэффициент «постели»; b - ширина балки; $y(x)$ - величина осадки (перемещения).

Простым периодическим решением уравнения собственных колебаний балки (2) является главное колебание, которое изменяется по гармоническому закону:

$$y(x, t) = \varphi(x) \sin(\omega t + \alpha) \quad (4)$$

где $\varphi(x)$ - функция, устанавливающая закон распределения максимальных отклонений точек оси балки от равновесного расположения; ω - круговая частота собственных поперечных колебаний балки (рад/сек); α - начальная фаза колебаний.

Для определения собственных частот и форм колебаний, подставляя уравнение (4) в уравнение (2), включив реакцию упругого основания (3), и сократив на $\sin(\omega t + \alpha)$, получим уравнение собственных форм однородной задачи:

$$EI \varphi^{IV}(x) - \omega^2 \mu \varphi(x) + r \varphi(x) = 0, \quad (5)$$

где обозначим:

$$\kappa^4 = \frac{\mu \omega^2 - r}{EI}. \quad (6)$$

Решение уравнения (5) удобно представить в виде системы частных решений функций Крылова S, T, U, V :

$$\left. \begin{aligned} S(x) &= \frac{1}{2}(ch \kappa x + cos \kappa x), \\ T(x) &= \frac{1}{2}(sh \kappa x + sin \kappa x), \\ U(x) &= \frac{1}{2}(ch \kappa x - cos \kappa x), \\ V(x) &= \frac{1}{2}(sh \kappa x - sin \kappa x). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Используя метод начальных параметров, составим уравнение функции прогибов $\varphi(x)$, присоединив к нему первую, вторую и третью производные функции и получим четыре однородных уравнения, с помощью которых решим уравнение для определения собственных частот.

Обозначим прогиб балки $y(x)$, угол поворота $\theta = \frac{dy}{dx}$, изгибающий момент $M(x) = -EI \frac{d^2 y}{dx^2}$, поперечную силу $Q(x) = \frac{dM}{dx} = -EI \frac{d^3 y}{dx^3}$

Значения этих величин в начале координат - y_0, θ_0, M_0 и Q_0 .

Запишем значения начальных параметров и известных граничных условий:

$$\left. \begin{aligned} x = 0: M(0) = Q(0) = 0 \\ x = L: M(L) = Q(L) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Для произвольного сечения балки $0 \leq x \leq L$ составим систему уравнений, используя (7):

$$\left. \begin{aligned} y_i(x) &= y_0 S(\kappa_i x) + \frac{\theta_0}{\kappa_i} T(\kappa_i x) \\ \theta_i(x) &= y_0 \kappa_i V(\kappa_i x) + \theta_0 S(\kappa_i x) \\ M_i(x) &= -EJ y_0 \kappa_i^2 U(\kappa_i x) - EJ \theta_0 \kappa_i V(\kappa_i x) \\ Q_i(x) &= -EJ y_0 \kappa_i^3 T(\kappa_i x) - EJ \theta_0 \kappa_i^2 U(\kappa_i x) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Здесь $i=1, 2, 3$, и т.д. – порядковый номер частоты.

Используя граничные условия на правом краю (8), получим из (9):

$$\left\{ \begin{aligned} M_i(L) &= -EJ y_0 \kappa_i^2 U(\kappa_i L) - EJ \theta_0 \kappa_i V(\kappa_i L) = 0 \\ Q_i(L) &= -EJ y_0 \kappa_i^3 T(\kappa_i L) - EJ \theta_0 \kappa_i^2 U(\kappa_i L) = 0 \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Для нетривиального решения уравнений (10), т.е. решения, при котором все произвольные постоянные не были одновременно равны нулю, необходимо, чтобы определитель D был равен нулю:

$$D = U^2(\kappa_i L) - V(\kappa_i L) T(\kappa_i L) = -\frac{1}{2} \operatorname{ch} \kappa_i L \cos \kappa_i L = 0 \quad (11)$$

Корни уравнения (11) различны. Каждому значению корня будет соответствовать определенная круговая частота собственных поперечных колебаний. Из условий ортогональности нормальных функций [7-8] следует, что собственные колебания, вызванные любыми начальными условиями, можно легко разложить в ряд нормальных колебаний. Определим численно множество значений корней κ_i уравнения (11). Используя выражение (6) получим формулу для определения ω_i круговых частот собственных поперечных колебаний балки на упругом основании:

$$\omega_i = \sqrt{\frac{EI \lambda_i^4}{\mu L^4} + \frac{r}{\mu}}, \quad (12)$$

где $\lambda_i = \kappa_i L$, а $i=1, 2, 3$ и т.д. – порядковый номер частоты.

Определим собственные круговые частоты поперечных колебаний балки с учетом собственного веса, которые образуют спектр $\omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_n$. Каждой собственной частоте будет соответствовать определенная форма колебаний.

Для определения форм собственных колебаний значения корней κ_i подставим в решение первого уравнения (9), которое определит значения относительных ординат i -той формы собственных колебаний.

Второй этап. Определим собственные круговые частоты и формы поперечных колебаний с учетом собственного веса и присоединенной массы m_1 (рисунок 2) для балки со свободными краями длиной L с изгибной жесткостью EI , расположенной на упругом основании Винклера с коэффициентом жесткости r_0 .

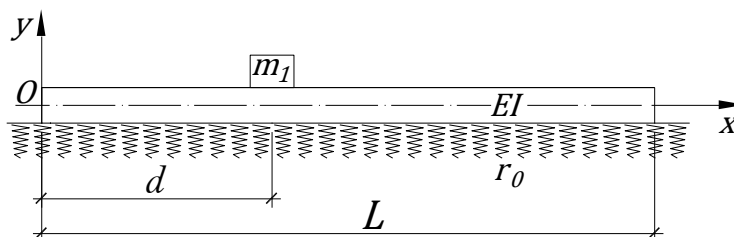


Рисунок 2 - Балка на упругом основании с присоединенной массой m_1

При статическом приложении массы, которая медленно возрастает от нуля до полной величины, колебания не возникают. Если же к системе, которая находится в покое, приложить массу сразу полной величиной и оставить её на системе, предоставленной самой себе, то она вызовет колебания системы. В этом случае уравнения колебания системы составляются на основе принципа Даламбера, согласно которому уравнения динамического равновесия можно получить из уравнений статического равновесия добавлением инерционных сил. Сила инерции I по величине равна произведению массы на ускорение:

$$I = -m\ddot{y} = -m \frac{d^2 y}{dt^2}$$

и направлена в противоположную ускорению сторону. Здесь m – масса; y – перемещение; $\ddot{y} = \frac{d^2 y}{dt^2}$ – ускорение. Дальнейшие вычисления позволяют получить уравнения скорости \dot{y} и ускорения \ddot{y} массы при свободных незатухающих колебаниях и далее определить силу инерции I :

$$\dot{y} = -\omega A \sin(\omega t - \alpha); \quad \ddot{y} = -\omega^2 A \cos(\omega t - \alpha);$$

$$I = m\omega^2 A \cos(\omega t - \alpha) \quad (13)$$

Используем значения начальных параметров и известных граничных условий на левом и правом краю балки (10).

Для первого участка балки $0 \leq x \leq d$ составим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} y_{1i}(x) &= y_0 S(\kappa_i x) + \frac{\theta_0}{\kappa_i} T(\kappa_i x) \\ \theta_{1i}(x) &= y_0 \kappa_i V(\kappa_i x) + \theta_0 S(\kappa_i x) \\ M_{1i}(x) &= -EJ y_0 \kappa_i^2 U(\kappa_i x) - EJ \theta_0 \kappa_i V(\kappa_i x) \\ Q_{1i}(x) &= -EJ y_0 \kappa_i^3 T(\kappa_i x) - EJ \theta_0 \kappa_i^2 U(\kappa_i x) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

В случае приложения массы m_1 в точке d значение прогиба балки имеет вид: $y_{1i}(d) = y_0 S(\kappa_i d) + \frac{\theta_0}{\kappa_i} T(\kappa_i d)$. Свободные колебания балки происходят с учетом инерционной силы, которая в точке d может быть определена по (13):

$$I = m_1 \omega_i^2 y_{1i}(d) = m_1 \omega_i^2 \left[y_0 S(\kappa_i d) + \frac{\theta_0}{\kappa_i} T(\kappa_i d) \right], \quad (15)$$

где ω_i – круговая собственная частота i -той формы колебаний балки; $y_{1i}(d)$ – значение ординаты i -той формы колебаний в точке d .

Для второго участка балки $d \leq x \leq L$ составим систему уравнений, учитывая силу инерции I (17):

$$\left. \begin{aligned} y_{2i}(x) &= y_0 S(\kappa_i x) + \frac{\theta_0}{\kappa_i} T(\kappa_i x) + \frac{I}{\kappa_i^3 EI} V(\kappa_i(x-d)) \\ \theta_{2i}(x) &= y_0 \kappa_i V(\kappa_i x) + \theta_0 S(\kappa_i x) + \frac{I}{\kappa_i^2 EI} U(\kappa_i(x-d)) \\ M_{2i}(x) &= -EJ y_0 \kappa_i^2 U(\kappa_i x) - EJ \theta_0 \kappa_i V(\kappa_i x) - \frac{I}{\kappa_i} T(\kappa_i(x-d)) \\ Q_{2i}(x) &= -EJ y_0 \kappa_i^3 T(\kappa_i x) - EJ \theta_0 \kappa_i^2 U(\kappa_i x) - IS(\kappa_i(x-d)) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Далее, подставив (15) в уравнения (18) и упростив выражения, получим формулы для определения прогибов, углов поворота, моментов и поперечных сил для второго участка балки:

$$\left. \begin{aligned}
 y_{2i}(x) &= y_0 \left[S(\kappa_i x) + \frac{m_1 \omega_i^2 S(\kappa_i d)}{\kappa_i^3 EI} V(\kappa_i(x-d)) \right] + \\
 &+ \theta_0 \left[\frac{1}{\kappa_i} T(\kappa_i x) + \frac{m_1 \omega_i^2 + \theta_0 T(\kappa_i d)}{\kappa_i^3 EI} V(\kappa_i(x-d)) \right], \\
 \theta_{2i}(x) &= y_0 \left[\kappa_i V(\kappa_i x) + \frac{m_1 \omega_i^2 y_0 S(\kappa_i d)}{\kappa_i^2 EI} U(\kappa_i(x-d)) \right] + \\
 &+ \theta_0 \left[S(\kappa_i x) + \frac{m_1 \omega_i^2 + \frac{1}{\kappa_i} T(\kappa_i d)}{\kappa_i^2 EI} U(\kappa_i(x-d)) \right], \\
 M_{2i}(x) &= -y_0 \left[\kappa_i^2 U(\kappa_i x) + \frac{m_1 \omega_i^2 S(\kappa_i d)}{EJ \kappa_i} T(\kappa_i(x-d)) \right] - \\
 &- \theta_0 \left[\kappa_i V(\kappa_i x) + \frac{m_1 \omega_i^2 \frac{1}{\kappa_i} T(\kappa_i d)}{EJ \kappa_i} T(\kappa_i(x-d)) \right] \\
 Q_{2i}(x) &= -y_0 \left[\kappa_i^3 T(\kappa_i x) + \frac{m_1 \omega_i^2}{EJ} S(\kappa_i d) S(\kappa_i(x-d)) \right] - \\
 &- \theta_0 \left[\kappa_i^2 U(\kappa_i x) + \frac{m_1 \omega_i^2}{EJ \kappa_i} T(\kappa_i d) S(\kappa_i(x-d)) \right]
 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Используя граничные условия на правой опоре (10), получим:

$$\left\{ \begin{aligned}
 M_{2i}(L) &= -y_0 \left[\kappa_i^2 U(\kappa_i L) + \frac{m_1 \omega_i^2 S(\kappa_i d)}{EJ \kappa_i} T(\kappa_i(L-d)) \right] - \\
 &- \theta_0 \left[\kappa_i V(\kappa_i L) + \frac{m_1 \omega_i^2}{EJ \kappa_i^2} T(\kappa_i d) T(\kappa_i(L-d)) \right] = 0 \\
 Q_{2i}(L) &= -y_0 \left[\kappa_i^3 T(\kappa_i L) + \frac{m_1 \omega_i^2}{EJ} S(\kappa_i d) S(\kappa_i(L-d)) \right] - \\
 &- \theta_0 \left[\kappa_i^2 U(\kappa_i L) + \frac{m_1 \omega_i^2}{EJ \kappa_i} T(\kappa_i d) S(\kappa_i(L-d)) \right] = 0
 \end{aligned} \right. \quad (18)$$

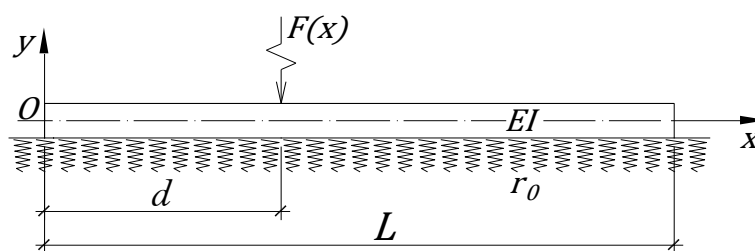
Приравняв определитель матрицы, составленный из коэффициентов системы уравнений (18), нулю, получим трансцендентное уравнение:

$$\begin{aligned}
 D &= U^2(\kappa_i L) - V(\kappa_i L) T(\kappa_i L) + \frac{m_1 \kappa_i}{\mu} \left(1 + \frac{r}{\kappa_i^4 EJ} \right) [S(\kappa_i d) T(\kappa_i(L-d)) U(\kappa_i L) + \\
 &+ T(\kappa_i d) S(\kappa_i(L-d)) U(\kappa_i L) - T(\kappa_i d) T(\kappa_i(L-d)) T(\kappa_i L) - \\
 &- S(\kappa_i d) S(\kappa_i(L-d)) V(\kappa_i L)] = 0
 \end{aligned} \quad (19)$$

Каждому значению корня κ_i трансцендентного уравнения соответствует определенная круговая частота собственных колебаний. Определив численно множество значений корней κ_i уравнения (19), определим круговые частоты собственных колебаний балки на упругом основании по формуле (17). Минимальный положительный корень κ_i определит первую круговую частоту собственных поперечных колебаний балки.

Для определения форм собственных колебаний значения корней κ_i подставляем в решение первого уравнения (17), которое определит значения относительных ординат i -той формы собственных колебаний.

Третий этап. Для балки (рисунок 3) со свободными краями длиной L с изгибной жесткостью EI , расположенной на упругом основании Винклера с коэффициентом жесткости r_0 определим усилия при действии динамической нагрузки (возмущающей силы) $F(t) = F \sin \gamma t$, приложенной в произвольной точке d .


 Рисунок 3 - Балка с динамической силой $F(t)$

Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний балки постоянного сечения с равномерно распределенной массой при отсутствии сил сопротивления имеет общий вид:

$$EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \mu \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = q(x,t), \quad (20)$$

где: $q(x,t)$ – возмущающая нагрузка, изменяющаяся во времени t . Если возмущающая нагрузка равномерно распределена по всей длине балки, то $q(x,t) = q(t)$ и не зависит от x .

В общем случае действия возмущающей нагрузки $q(x,t) = q(x) \sin \gamma t$ при установившихся вынужденных колебаниях балки и без учета неупругих сил сопротивления фазы колебаний и возмущающей нагрузки совпадают. Положив, что вынужденные колебания также изменяются по гармоническому закону:

$$y(x,t) = \varphi(x) \sin(\gamma t), \quad (21)$$

получим неоднородное дифференциальное уравнение вынужденных колебаний балки на упругом основании:

$$EI \varphi^{IV}(x) - \gamma^2 \mu \varphi(x) + r \varphi(x) = q(x), \quad (22)$$

где обозначим:

$$\kappa^4 = \frac{\mu \gamma^2 - r}{EI}. \quad (23)$$

Общее решение неоднородного уравнения (22) получим как сумму общего решения однородного уравнения и частного решения, которое зависит от вида нагрузки. Далее, используя метод начальных параметров, получим универсальные формулы для определения прогибов, углов поворота, моментов и поперечных сил для произвольного участка балки в общем случае действия возмущающей нагрузки $q(x,t)$.

Используем известные значения начальных параметров и известных граничных условий на левом и правом краю балки (8).

Для первого участка балки $0 \leq x \leq d$ составим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} y_1(x) &= y_0 S(\kappa x) + \frac{\theta_0}{\kappa} T(\kappa x) \\ \theta_1(x) &= y_0 \kappa V(\kappa x) + \theta_0 S(\kappa x) \\ M_1(x) &= -EJ y_0 \kappa^2 U(\kappa x) - EJ \theta_0 \kappa V(\kappa x) \\ Q_1(x) &= -EJ y_0 \kappa^3 T(\kappa x) - EJ \theta_0 \kappa^2 U(\kappa x) \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Уравнение собственных колебаний балки с инерционными силами и уравнение вынужденных колебаний балки от возмущающей силы, несмотря на существенные различия между свободными колебаниями и вынужденными колебаниями, можно рассматривать совместно, относя инерционные действия масс на балку к возмущающим силам [11].

Составим систему уравнений для второго участка балки $d \leq x \leq L$, учитывая возмущающую силу F :

$$\left. \begin{aligned} y_2(x) &= y_0 S(\kappa x) + \frac{\theta_0}{\kappa} T(\kappa x) + \frac{F}{\kappa^3 EI} V(\kappa(x-d)) \\ \theta_2(x) &= y_0 \kappa V(\kappa x) + \theta_0 S(\kappa x) + \frac{F}{\kappa^2 EI} U(\kappa(x-d)) \\ M_2(x) &= -EJ y_0 \kappa^2 U(\kappa x) - EJ \theta_0 \kappa V(\kappa x) - \frac{F}{\kappa} T(\kappa(x-d)) \\ Q_2(x) &= -EJ y_0 \kappa^3 T(\kappa x) - EJ \theta_0 \kappa^2 U(\kappa x) - FS(\kappa(x-d)) \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Используя граничные условия для правого края балки (8), получим:

$$\begin{cases} M_2(L): -EJy_0 \kappa^2 U(\kappa x) - EJ \theta_0 \kappa V(\kappa x) = \frac{F}{\kappa} T(\kappa(x-d)) \\ Q_2(L): -EJy_0 \kappa^3 T(\kappa x) - EJ \theta_0 \kappa^2 U(\kappa x) = FS(\kappa(x-d)) \end{cases} \quad (26)$$

Используя (23), при заданной частоте вынужденных колебаний γ , определим κ :

$$\kappa = \sqrt[4]{\frac{\mu\gamma^2 - r}{EJ}} \quad (27)$$

Применяя уравнения (25) с учетом определенного значения κ (26), соответствующего заданной частоте γ вынужденных колебаний и значения $F(t)$, определим усилия в балке при вынужденных колебаниях.

Результаты исследования и их анализ

Исходные данные принятые для расчетов: балки длиной: $L_1=12,0$ м и $L_2=20,0$ м, каждая из которых имеет модули упругости: $E_1=10^6$ т/м²; $E_2=2,1 \times 10^6$ т/м²; $E_3=3,6 \times 10^6$ т/м² и расположена на основании с коэффициентом постели: $r_0^1=3200$ т/м³, $r_0^2=5000$ т/м³, $r_0^3=10000$ т/м³. Ширина балки $b=1,25$ м, высота $h=1,5$ м. Сила $F=10,0$ т, масса $m_1=F/g=1,0194$ т.

На первом этапе по результатам расчетов для балок длиной 12 и 20 м без присоединенной массы m_1 численно получены первые три корня уравнения (11): $\kappa_1 L = 1,57$; $\kappa_2 L = 4,73$; $\kappa_3 L = 7,853$. На втором этапе для вышеназванных балок с присоединенной массой m_1 получены первые три корня уравнения (18) при расположении m_1 в середине балки $d=L/2$: $\kappa_1 L = 4,44$; $\kappa_2 L = 7,854$; $\kappa_3 L = 10,610$ и при расположении m_1 в четверти балки $d=L/4$: $\kappa_1 L = 4,71$; $\kappa_2 L = 7,63$; $\kappa_3 L = 10,723$. Определены собственные круговые частоты и формы поперечных колебаний балки для первых трех форм.

Результаты расчетов представлены в таблицах 1 и 2. В таблицах в числителе указаны значения частот для материала плотностью $2,1$ т/м³, в знаменателе - $2,5$ т/м³.

Таблица 1 - Собственные круговые частоты поперечных колебаний балок длиной 12,0 м

	$L_1=12,0$ м								
	$E_1 = 10^6$ т/м ²			$E_2 = 2,1 \times 10^6$ т/м ²			$E_3 = 3,6 \times 10^6$ т/м ²		
	$r_0^1=3200$ т/м ³	$r_0^2=5000$ т/м ³	$r_0^3=10000$ т/м ³	$r_0^1=3200$ т/м ³	$r_0^2=5000$ т/м ³	$r_0^3=10000$ т/м ³	$r_0^1=3200$ т/м ³	$r_0^2=5000$ т/м ³	$r_0^3=10000$ т/м ³
Собственная круговая частота колебаний ω балки без массы m_1, рад/сек									
1-ая форма	<u>101,1</u> 92,7	<u>125,8</u> 115,3	<u>177,2</u> 162,4	<u>102,5</u> 93,4	<u>126,9</u> 116,3	<u>178</u> 163,1	<u>104,4</u> 95,7	<u>128,5</u> 117,7	<u>179,1</u> 164,1
2-ая форма	<u>176,4</u> 161,7	<u>191,6</u> 175,6	<u>228,7</u> 209,6	<u>233,2</u> 213,7	<u>244,9</u> 224,5	<u>274,9</u> 251,9	<u>293,4</u> 268,9	<u>302,8</u> 277,6	<u>327,7</u> 300,2
3-ая форма	<u>413,0</u> 378,5	<u>419,7</u> 384,4	<u>437,9</u> 401,4	<u>589,9</u> 540,1	<u>594,0</u> 544,5	<u>607,0</u> 556,3	<u>766,9</u> 702,9	<u>770,6</u> 706,3	<u>780,6</u> 715,5
Собственная круговая частота колебаний ω балки с массой m_1 в точке $d=L/2$, рад/сек									
1-ая форма	<u>162,4</u> 148,9	<u>178,8</u> 163,9	<u>218,1</u> 199,9	<u>210,8</u> 193,2	<u>223,7</u> 205,0	<u>256,2</u> 234,8	<u>262,8</u> 240,9	<u>273,3</u> 250,4	<u>300,4</u> 275,3
2-ая форма	<u>413,2</u> 378,9	<u>419,9</u> 384,8	<u>438,0</u> 401,5	<u>589,5</u> 540,3	<u>594,2</u> 544,6	<u>607,2</u> 556,5	<u>767,2</u> 703,1	<u>770,8</u> 706,5	<u>780,9</u> 715,7
3-ая форма	<u>738,4</u> 676,8	<u>742,2</u> 680,2	<u>752,6</u> 689,8	<u>1064,9</u> 976,0	<u>1067,6</u> 978,4	<u>1074,8</u> 985,1	<u>1391,8</u> 1275,1	<u>1393,8</u> 1277,4	<u>1399,3</u> 1282,5
Собственная круговая частота колебаний балки ω с массой m_1 в точке $d=L/4$, рад/сек									
1-ая форма	<u>175,4</u> 160,7	<u>190,7</u> 174,8	<u>227,9</u> 208,9	<u>231,6</u> 212,2	<u>243,4</u> 223,0	<u>273,5</u> 250,7	<u>291,2</u> 266,9	<u>300,7</u> 275,6	<u>325,5</u> 298,4
2-ая форма	<u>391,3</u> 358,6	<u>398,4</u> 365,2	<u>417,5</u> 382,6	<u>557,3</u> 510,8	<u>562,3</u> 515,4	<u>576,0</u> 527,9	<u>724,8</u> 664,3	<u>728,7</u> 667,8	<u>739,3</u> 677,6
3-ая форма	<u>753,9</u> 691,0	<u>757,6</u> 694,4	<u>767,9</u> 703,8	<u>1087,5</u> 996,7	<u>1090,1</u> 999,1	<u>1097,2</u> 1005,6	<u>1421,4</u> 1302,7	<u>1423,4</u> 1304,6	<u>1428,8</u> 1309,6

Таблица 2 - Собственные круговые частоты поперечных колебаний балок длиной 20,0 м

	$L_2=20,0$ м								
	$E_1 = 10^6$ т/м ²			$E_2 = 2,1 \times 10^6$ т/м ²			$E_3 = 3,6 \times 10^6$ т/м ²		
	$r_0^1=3200$ т/м ³	$r_0^2=5000$ т/м ³	$r_0^3=10000$ т/м ³	$r_0^1=3200$ т/м ³	$r_0^2=5000$ т/м ³	$r_0^3=10000$ т/м ³	$r_0^1=3200$ т/м ³	$r_0^2=5000$ т/м ³	$r_0^3=10000$ т/м ³
Собственная круговая частота колебаний ω балки без массы m_1, рад/сек									
1-ая форма	<u>99,9</u> 91,6	<u>124,9</u> 114,5	<u>176,6</u> 161,8	<u>100,2</u> 91,8	<u>125,1</u> 114,6	<u>176,7</u> 161,9	<u>100,4</u> 92,0	<u>125,3</u> 114,8	<u>176,8</u> 162,1
2-ая форма	<u>112,7</u> 103,3	<u>135,3</u> 124,0	<u>184,1</u> 168,7	<u>125,4</u> 114,9	<u>146,0</u> 133,8	<u>192,0</u> 176,0	<u>140,8</u> 129,0	<u>159,5</u> 146,2	<u>202,5</u> 185,6
3-ая форма	<u>175,5</u> 160,8	<u>190,7</u> 174,8	<u>227,9</u> 208,9	<u>231,7</u> 212,3	<u>243,5</u> 223,2	<u>273,6</u> 250,8	<u>291,4</u> 267,1	<u>300,9</u> 275,7	<u>325,7</u> 298,5
Собственная круговая частота колебаний балки ω с массой m_1 в точке $d=L/2$, рад/сек									
1-ая форма	<u>110,0</u> 100,8	<u>133,0</u> 121,9	<u>182,4</u> 167,2	<u>120,1</u> 110,1	<u>141,6</u> 129,7	<u>188,7</u> 173,0	<u>132,8</u> 121,7	<u>152,4</u> 139,7	<u>197,0</u> 180,5
2-ая форма	<u>175,5</u> 160,8	<u>190,8</u> 174,9	<u>228,0</u> 208,9	<u>231,8</u> 212,4	<u>243,5</u> 223,2	<u>273,7</u> 250,8	<u>291,5</u> 267,1	<u>300,9</u> 275,8	<u>325,8</u> 298,6
3-ая форма	<u>281,7</u> 258,2	<u>291,5</u> 267,1	<u>317,0</u> 290,6	<u>394,5</u> 361,6	<u>401,6</u> 368,0	<u>420,5</u> 385,4	<u>509,6</u> 467,1	<u>515,1</u> 472,1	<u>530,0</u> 485,7
Собственная круговая частота колебаний балки ω с массой m_1 в точке $d=L/4$, рад/сек									
1-ая форма	<u>112,5</u> 103,1	<u>135,2</u> 123,9	<u>183,9</u> 168,6	<u>125,0</u> 114,6	<u>145,7</u> 133,5	<u>191,8</u> 175,8	<u>140,2</u> 128,5	<u>159,0</u> 145,7	<u>202,1</u> 185,2
2-ая форма	<u>168,9</u> 154,8	<u>184,7</u> 169,3	<u>222,9</u> 204,3	<u>221,2</u> 202,7	<u>233,5</u> 214,0	<u>264,8</u> 242,7	<u>277,1</u> 253,9	<u>287,0</u> 263,0	<u>312,9</u> 286,8
3-ая форма	<u>287,0</u> 263,0	<u>296,6</u> 271,8	<u>321,7</u> 294,9	<u>402,4</u> 368,8	<u>409,3</u> 375,2	<u>427,9</u> 392,2	<u>520,1</u> 476,7	<u>525,5</u> 481,6	<u>540,1</u> 495,0

На первом этапе построены очертания первых трех форм колебаний балок без присоединенной массы (рисунки 4 и 5), соответствующие собственным частотам.

Собственные формы колебаний балки $L=12$ м

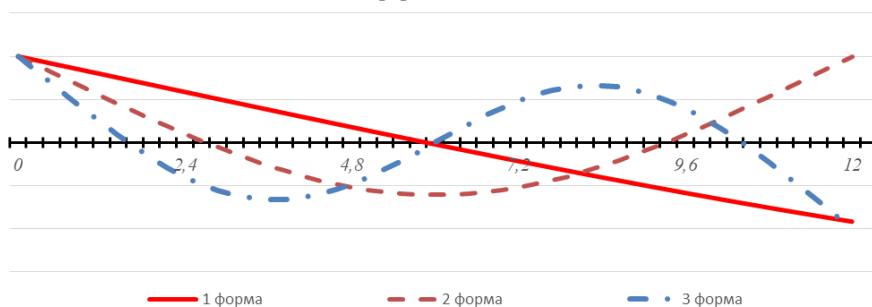


Рисунок 4 - Собственные формы колебаний балки $L=12$ м без присоединенной массы m_1

Собственные формы колебаний балки $L=20$ м

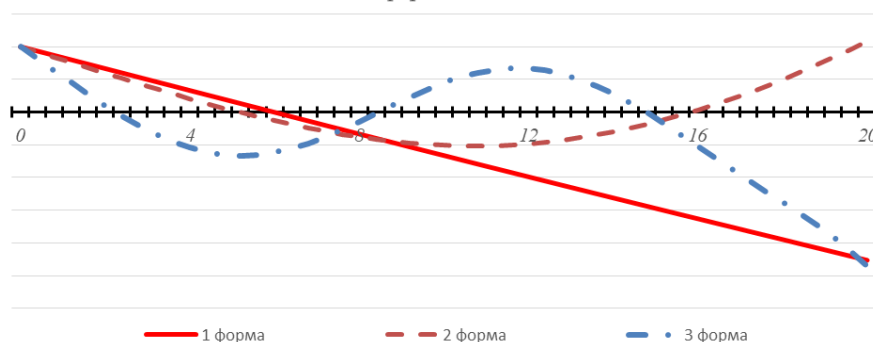


Рисунок 5 - Собственные формы колебаний балки $L=20$ м без присоединенной массы m_1

Далее, на втором этапе построены очертания первых трех форм колебаний балок с присоединенной массой, расположенной в точке $d=L/2$ (рисунки 6 и 7).

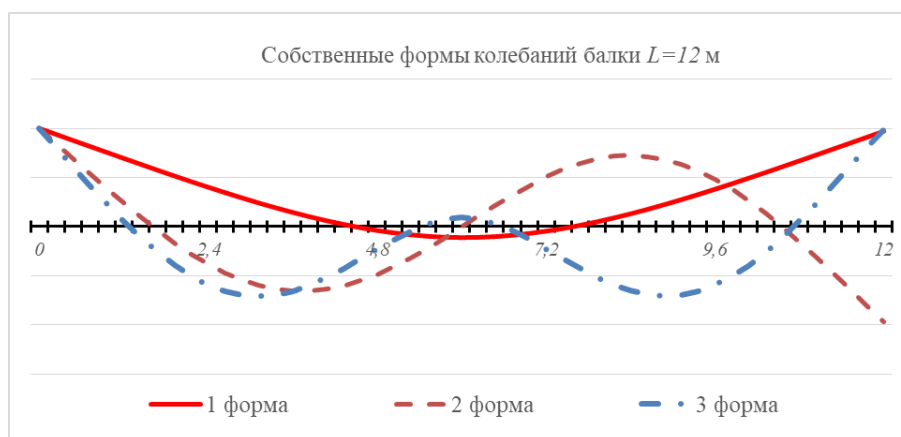


Рисунок 6 - Собственные формы колебаний балки $L=12$ м с присоединенной массой m_1

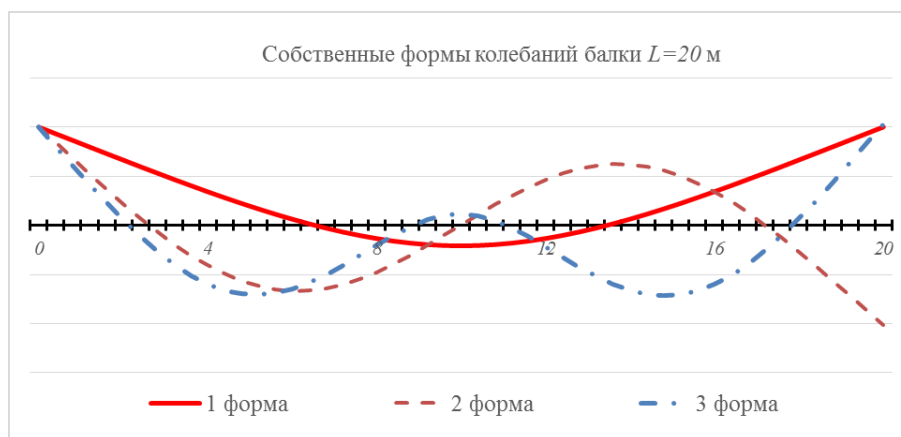


Рисунок 7 - Собственные формы колебаний балки $L=20$ м с присоединенной массой m_1

Полученные результаты расчетов позволяют сделать следующие выводы:

- 1) с приложением в точке балки дополнительной массы m_1 изменяются частоты колебаний. Если увеличивается масса системы, то уменьшаются частоты колебаний системы и наоборот (без учета первой (крутильной) формы собственных колебаний балки);
- 2) с изменением точки приложения дополнительной массы m_1 изменяются частоты колебаний. Масса, приложенная в середине балки, увеличивает частоту колебаний для второй формы больше, чем для первой или третьей формы. Масса, приложенная в четверти длины балки, увеличивает частоту колебаний для первой или третьей форм больше, чем для второй формы;
- 3) для балок на упругом основании без присоединенной массы m_1 первая форма колебаний соответствует вращательному движению балки как твердого тела. Так как первой формой изгибных колебаний является вторая форма, это следует учитывать при динамическом анализе. Для балки на упругом основании с присоединенной массой m_1 расположенной в точке $d=L/2$ первая, вторая, третья формы колебаний являются изгибными.

По результатам расчета третьего этапа определены значения κ от вынужденных частот колебаний $\gamma_1=220$ рад/сек и $\gamma_2=400$ рад/сек для балки длиной 12,0 м с возмущающей силой $F=10,0$ т, приложенной в точках $d=L/2$ и $d=L/4$ и значения κ от вынужденных частот колебаний $\gamma_1=140$ рад/сек и $\gamma_2=400$ рад/сек для балки длиной 20,0 м соответственно. Балки с модулем упругости $E=2,1 \times 10^6$ т/м² расположены на основании с коэффициентом постели

$r_0=5000 \text{ т/м}^3$. С учетом указанных исходных данных определены перемещения и усилия в балках. Эпюры изгибающих моментов приведены на рисунках 8-11.

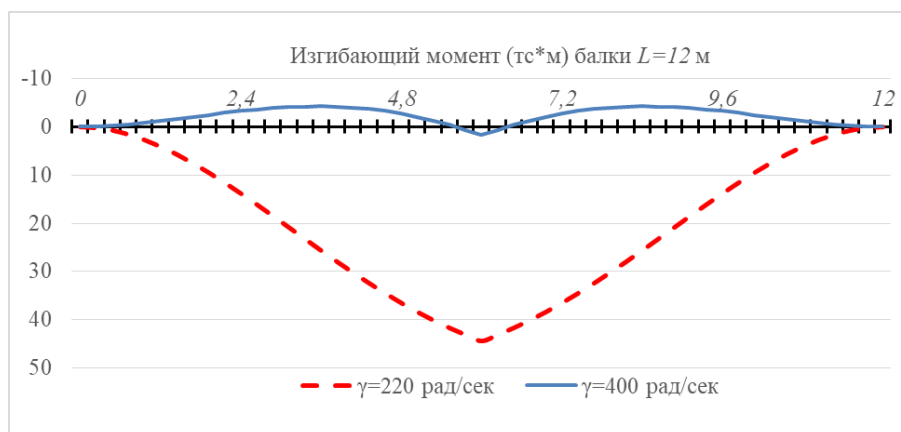


Рисунок 8 - Эпюры изгибающих моментов балки $L=12 \text{ м}$ при действии силы $F(t)$ в точке $d=L/2$

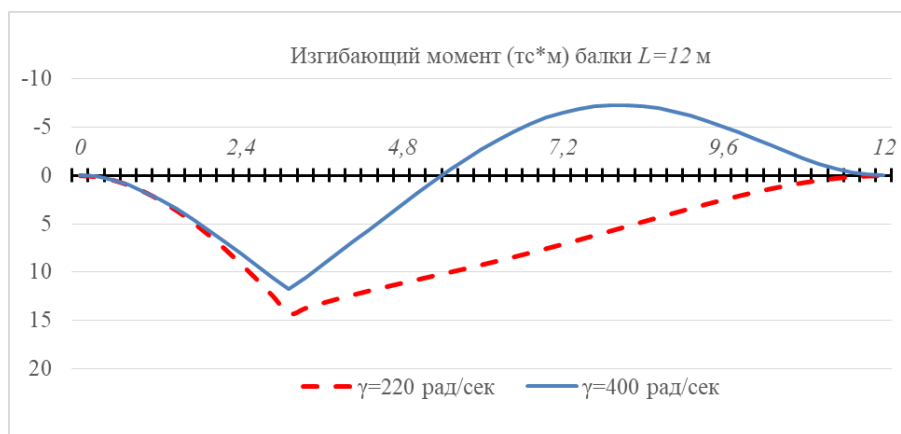


Рисунок 9 - Эпюры изгибающих моментов балки $L=12 \text{ м}$ при действии силы $F(t)$ в точке $d=L/4$

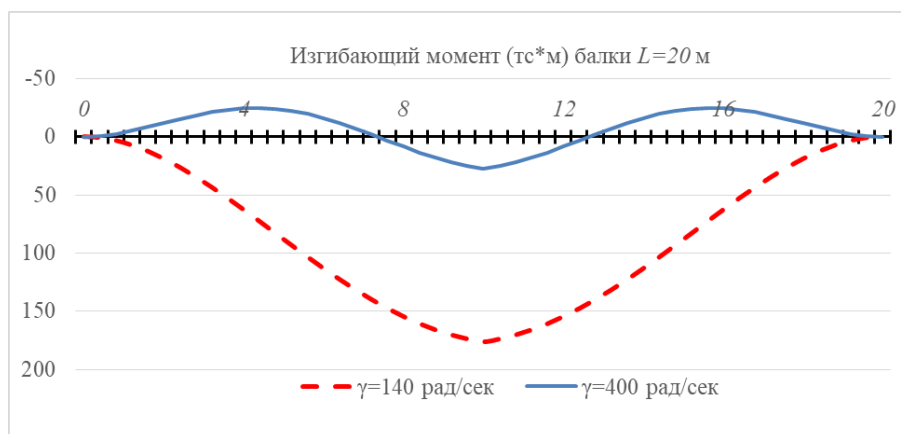


Рисунок 10 - Эпюры изгибающих моментов балки $L=20 \text{ м}$ при действии силы $F(t)$ в точке $d=L/2$

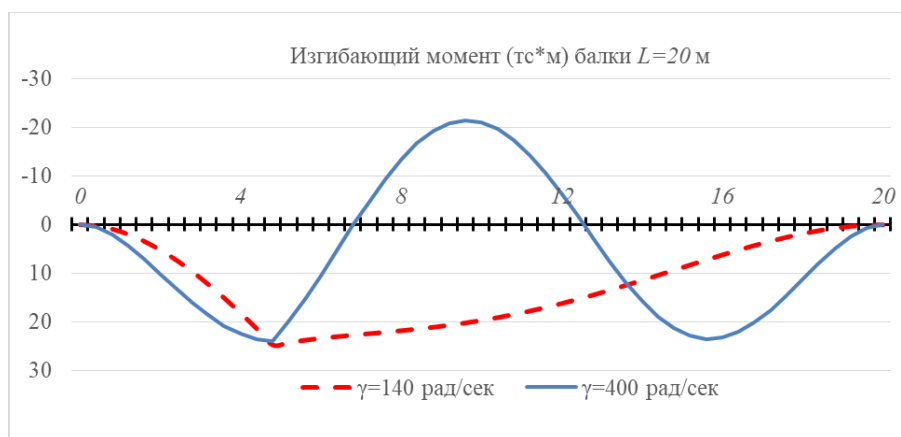


Рисунок 11 - Эпюры изгибающих моментов балки $L=20$ м при действии силы $F(t)$ в точке $d=L/4$

Анализ результатов расчетов третьего этапа позволяет сделать следующие выводы. В случае приложения в середине балки ($d=L/2$) возмущающей силы с частотой вынужденных колебаний, близкой к частоте собственных колебаний для первой изгибной формы ($\gamma_1/\omega_1=220/244,9$ рад/сек и $\gamma_1/\omega_1=140/146,0$ рад/сек для балок длиной 12 и 20 м соответственно), перемещения и усилия в сечениях балки увеличиваются многократно, что соответствует резонансным колебаниям при действии периодической нагрузки. Действие возмущающей силы с частотой вынужденных колебаний $\gamma_2=400$ рад/сек находится в межрезонансной зоне отношения частот, с соответствующими амплитудами и усилиями.

Случай приложения в четверти балки ($d=L/4$) возмущающей силы с частотой вынужденных колебаний, близкой к частоте собственных колебаний, не приводит к резонансным колебаниям по сравнению со случаем приложения нагрузки в середине балки ($d=L/2$). Усилия в балках при действии возмущающей силы с вынужденными частотами колебаний $\gamma_1=220$ (140) рад/сек и $\gamma_2=400$ рад/сек для балок длиной 12 и 20 м соответственно, близки по значениям.

Выводы

Результаты расчетов собственных поперечных колебаний системы (балка-основание) позволяют сделать следующие выводы:

1) изменение жесткости системы связано с изменением потенциальной энергии. Если жесткость системы увеличивается без изменения кинетической энергии, то частоты системы увеличиваются или по крайней мере не уменьшаются. Изменение массы системы связано с изменением её кинетической энергии. Если масса системы увеличивается без изменения потенциальной энергии, то частоты системы убывают или по крайней мере не возрастают;

2) при выполнении динамического расчета необходимо рассматривать все возможные варианты приложения масс с учетом точек их расположения. Число определяемых частот и форм собственных колебаний для балок на упругом основании не должно составлять менее двух;

3) число учитываемых форм колебаний следует определять с учетом частоты возмущающей силы. В случае, если $\gamma = \omega$, т.е. частота вынужденных колебаний совпадает с частотой собственных колебаний, конструкция попадает в резонанс, что приводит к многократному увеличению амплитуды вынужденных колебаний на определенных частотах внешних воздействий. Частота собственных колебаний для принятой в расчет наименьшей формы колебаний должна превышать частоту вынужденных колебаний. При этом главный вклад вносит резонирующая форма колебаний. Увеличение амплитуды и усилий зависит от точки приложения возмущающей силы.

Данные условия необходимо учитывать при анализе динамического поведения конструкции под действием переменных нагрузок в различных расчетных ситуациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 30.12.2010 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» (вступил в силу с 1 июля 2010 года). Новосибирск: Сиб. Унив. Изд-во, 2010. 31 с.
2. ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения». Москва, Стандартинформ, 2015.
3. СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения» / Минстрой России, 2018.
4. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопrotивление материалов. 8-е изд., испр. М.: Студент, 2012. 560 с: ил.
5. Крылов А.Н. О расчете балок, лежащих на упругом основании. Изд. 3-е. Ленинград: Изд-во АН СССР, 1930. 154 с. (Справочно-техническая литература). [На обл.: 1931 г.]
6. Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А. Расчет конструкций на упругом основании. М.:Стройиздат, 1973. 627 с.
7. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. М.: Наука, 1967.
8. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений // А.Ф. Смирнов, А.В. Александров, Б.Я. Лящеников, Н.Н. Шапошников М.: Стройиздат, 1984. 416 с.
9. Киселев В.А. Строительная механика: специальный курс (динамика и устойчивость сооружений). М. Стройиздат, 1980.
10. Динамический расчет зданий и сооружений / М.Ф. Барштейн, В.А. Ильичев, Б.Г. Коренев и др. – 2-е изд., перераб. и доп. М.:Стройиздат, 1984. 303 с., ил. – (Справочник проектировщика).
11. Бабаков И.М. Теория колебаний. М.: Наука, 1965. 560 с.
12. Клепиков С.Н. Расчет конструкций на упругом основании. Киев: Будівельник, 1967. 184 с.

REFERENCES

1. Federal Law of 30.12.2010 No. 384-FZ "Tekhnicheskiy reglament o bezopasnosti zdaniy i so-oruzheniy" ["Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures"] (entered into force on July 1, 2010). Novosibirsk: Sib. Univ. Publishing house, 2010.31 p.
2. GOST 27751-2014 "Nadezhnost' stroitel'nykh konstruktсий i osnovaniy. Osnovnyye polozheniya" ["Reliability of building structures and foundations. Basic provisions"]. Moscow, Standartinform, 2015.
3. SP 385.1325800.2018 "Zashchita zdaniy i sooruzheniy ot progressiruyushchego obrusheniya. Pravila proyektirovaniya. Osnovnyye polozheniya" ["Protection of buildings and structures against progressive collapse. Design rules. Basic provisions"] / Ministry of Construction of Russia, 2018.
4. Alexandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. Soprotivleniye materialov [Strength of materials]. 8th ed., Rev. Moscow: Student, 2012. 560 p.
5. Krylov A.N. O raschete balok, lezhashchikh na uprugom osnovanii [About the calculation of beams on an elastic foundation]. Ed. 3rd. Leningrad: Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1930.154 p. (Reference and technical literature). [On the region: 1931]
6. Gorbunov-Posadov M.I., Malikova T.A. Raschet konstruktсий na uprugom osnovanii [Calculation of structures on an elastic foundation]. Moscow: Stroyizdat, 1973. 627 p.
7. Timoshenko S.P. Kolebaniya v inzhenernom dele [Oscillations in engineering]. Moscow: Nauka, 1967.
8. Stroitel'naya mekhanika. Dinamika i ustoychivost' sooruzheniy [Construction mechanics. Dynamics and stability of structures] / A.F. Smirnov, A.V. Alexandrov, B. Ya. Lyashchennikov, N.N. Shaposhnikov. Moscow : Stroyizdat, 1984. 416 p.
9. Kiselev V.A. Stroitel'naya mekhanika: spetsial'nyy kurs (dinamika i ustoychivost' sooruzheniy) [Structural Mechanics: Special Course (Dynamics and Stability of Structures)]. Moscow: Stroyizdat, 1980.
10. Dinamicheskiy raschet zdaniy i sooruzheniy [Dynamic calculation of buildings and structures] / M.F. Barshtein, V.A. Ilyichev, B.G. Korenev et al. - 2nd ed., Revised. and add. M.: Stroyizdat, 1984.303 p., Ill. - (Designer handbook).
11. Babakov I.M. Teoriya kolebaniy [Oscillation theory]. Moscow : Nauka, 1965.560 p.
12. Klepikov S.N. Raschet konstruktсий na uprugom osnovanii [Calculation of structures on an elastic foundation]. Kiev: Budivelnik, 1967.184 p.

Информация об авторах

Леонтьев Евгений Владимирович

ФАУ «Главгосэкспертиза России», Москва, Россия,

заместитель начальника Управления – начальник отдела конструктивной надежности и безопасности объектов Управления строительных решений.

E-mail: e.leontyev@gge.ru

Information about authors

Leontiev Evgeny V.

FAU "Main State Expertise of Russia", Moscow, Russia,

Deputy Head of the Department - Head of the Department of Structural Reliability and Safety of Facilities of the Building Solutions Department.

E-mail: e.leontyev@gge.ru

А.В. ТУРКОВ¹, К.А. ИВАНУШКИНА¹¹ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Россия

ВЗАИМОСВЯЗЬ МАКСИМАЛЬНЫХ ПРОГИБОВ И ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ИЗОТРОПНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ПЛАСТИН ПРИ НЕОДНОРОДНЫХ УСЛОВИЯХ ОПИРАНИЯ ПО ВНЕШНЕМУ И ВНУТРЕННЕМУ КОНТУРУ

Аннотация. Рассматривается взаимосвязь максимальных прогибов от статической равномерно распределённой нагрузки W_0 и основной частоты собственных поперечных колебаний ω кольцевой изотропной пластинки при неоднородных условиях опирания по внешнему и внутреннему контуру в зависимости от соотношения радиуса внутреннего кольца к наружному радиусу пластинки. По результатам исследования построены графики зависимости максимального прогиба и частоты собственных колебаний пластинки от соотношения r/R . Показано, что для кольцевых пластинок при $r/R \leq 0,75$ коэффициент K с точностью до 4% совпадает с аналогичным коэффициентом для однопролётных балок с неоднородными граничными условиями.

Ключевые слова: кольцевая пластина, условия опирания, частота собственных колебаний, максимальный прогиб.

A. V. TURKOV¹, K. A. IVANUSHKINA¹¹Orel state University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia

RELATIONSHIP OF MAXIMUM DEFLECTIONS AND NATURAL FREQUENCIES VIBRATIONS OF ISOTROPIC CIRCULAR PLATES WITH INHOMOGENEOUS RESISTANCE CONDITIONS ON THE OUTER AND INNER CONTOUR

Abstracts. We consider the relationship between the maximum deflections from a static uniformly distributed load W_0 and the basic frequency of proper transverse vibrations of an annular isotropic plate under inhomogeneous support conditions along the outer and inner contour, depending on the ratio of the radius of the inner ring to the outer radius of the plate. Based on the results of the study, graphs of the dependence of the maximum deflection and the frequency of natural vibrations of the plate on the R/R ratio are constructed. It is shown that for annular plates at $r/R = 0.75$, the K coefficient coincides with the same coefficient for single-span beams with non-uniform boundary conditions to an accuracy of 4%.

Keywords: ring plate, support conditions, natural vibration frequency, maximum deflection

Введение

Конструктивные элементы в виде пластин широко применяются в различных областях промышленности, в том числе в строительстве. Они работают при различных видах нагружений (статических и динамических) и при различных закреплениях как по внешнему, так и по внутреннему контуру. Применение в современных зданиях несущих элементов конструкций в виде круглых кольцевых пластин или приближенных к ним вызывает потребность в их диагностике и оценке качества.

В работах проф. В.И. Коробко [1] была установлена фундаментальная закономерность для изотропных пластин постоянного сечения, согласно которой независимо от вида граничных условий пластины произведение её максимального прогиба W_0 от действия равномерно распределенной нагрузки q на квадрат основной частоты колебаний в ненагруженном состоянии ω с точностью до размерного множителя q/m есть величина постоянная:

$$W_0 \cdot \omega^2 = K \frac{q}{m}, \quad (1)$$

где m – равномерно распределённая по площади масса пластины.

Исследованиями взаимосвязи максимальных прогибов и частот собственных колебаний двухслойных пластин занимались В.И. Коробко и О.В. Бояркина (Калашникова) [2, 3], А.В. Турков, К.А. Жупкина (Иванушкина) [2, 4, 5], К.В. Марфин [6]. Исследованиям колебаний составных пластин посвящены также работы А.Р. Ржаницына [7], В.В. Филатова [8, 9], Fabien Marchetti, Kerem Ege, Quentin Leclère, N. V. Roozen [10], Han-Gyu Kim, Richard Wiebe [11] и др. Чтобы подтвердить закономерность (1) для составных многослойных пластин, были проведены их численные исследования при различном количестве слоёв и переменной жесткости связей сдвига между слоями.

В отличие от изотропных сплошных пластин, для кольцевых пластин с неоднородными граничными условиями по внутреннему и внешнему контуру эта закономерность еще мало изучена. Чтобы подтвердить закономерность (1) проведены численные исследования с использованием программного комплекса SCAD для кольцевых пластин с неоднородными граничными условиями (жёсткое опирание по внешнему контуру и шарнирное опирание по внутреннему контуру; шарнирное опирание по внешнему контуру и жёсткое опирание по внутреннему контуру) по внутреннему и внешнему контуру (рисунок 1). В качестве расчетной пластины была принята 60-угольная пластина внешним радиусом $R = 0,5$ м. Изначально при внутреннем радиусе $r = 0$ пластина была разбита на 1200 конечных элементов. В дальнейшем внутренний контур кольцевой пластины образовывался путём удаления одного ряда конечных элементов пластины. Опоры по контурам плиты располагались в узлах конечных элементов конструкции.

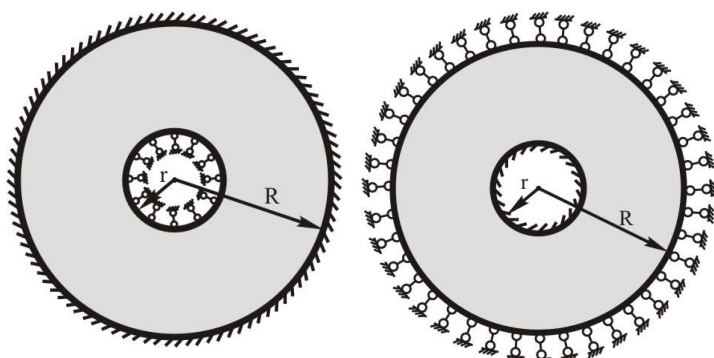


Рисунок 1 – Схемы опирания расчётных пластин по внешнему и внутреннему контуру

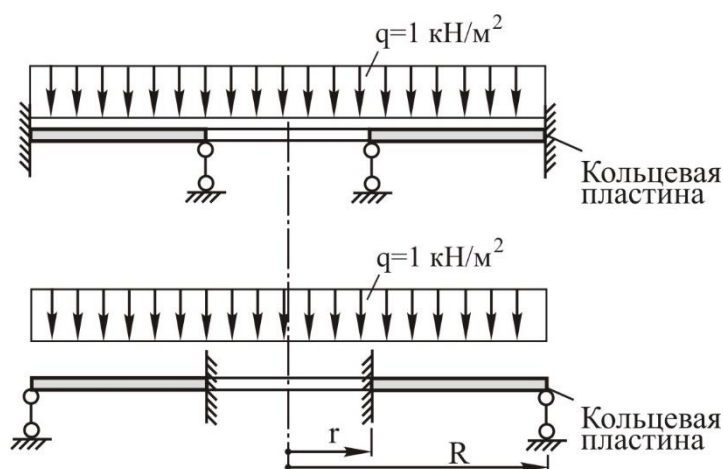


Рисунок 2 – Расчётные схемы кольцевых пластин

Опоры по контуру плиты располагались в узлах конечных элементов конструкции по внешнему и внутреннему контуру. Расчётные схемы пластин представлены на рисунке 2.

Пластина принята постоянного сечения толщиной $\delta = 8$ мм из древесно-стружечной плиты. Все характеристики приняты по паспорту изделия: толщина $\delta = 8$ мм, средняя плотность $\rho = 7,40$ кН/м³, модуль упругости при изгибе $E = 2600$ кН/м². Для динамического расчета массы в узлах собирались в соответствии с объемным весом и грузовой площадью узла. При статическом расчёте к верхнему слою прикладывалась равномерно распределённая нагрузка интенсивностью $1,0$ кН/м². Исследования проводились методом конечных элементов.

Расчеты выполнялись в программном комплексе SCAD. В результате расчёта определялся максимальный прогиб и частота основного тона поперечных колебаний пластин при изменении внутреннего радиуса r кольцевой пластины, которая изменялась от $r/R = 0$ (сплошная пластина с

опорой в центре) до $r/R = 0,9$. Результаты исследований пластины с комбинированными граничными условиями по внешнему и внутреннему контуру приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Результаты численных исследований кольцевой пластины с шарнирным опиранием по внешнему и жестким опиранием по внутреннему контурам

r/R	Круговая частота основного тона, ω (c^{-1})	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	$K=W_0 \omega^2/(q/m)$	$K_{теор}=W_0 \omega^2/(q/m)$ на основе аналитических W_0 и ω	Отклонение K от $K_{теор}$ (%)
0	282,7025	2,625620	1,292	1,285	-0,54
0,05	303,9536	2,271060	1,292		-0,54
0,10	337,6576	1,830380	1,285		0,00
0,15	379,2564	1,453230	1,287		-0,16
0,20	429,6042	1,128200	1,282		0,23
0,25	490,6286	0,866069	1,284		0,08
0,30	565,3623	0,650100	1,280		0,39
0,35	658,1346	0,480663	1,282		0,23
0,40	775,1888	0,345031	1,277		0,62
0,45	925,7630	0,243031	1,283		0,16
0,50	1123,6820	0,163470	1,271		1,09
0,55	1390,9280	0,107715	1,283		0,16
0,60	1763,7980	0,065385	1,253		2,49
0,65	2305,6710	0,039059	1,279		0,47
0,70	3138,1950	0,020408	1,238		3,66
0,75	4516,9220	0,010045	1,262		1,79
0,80	7036,7040	0,004003	1,221		4,98
0,85	12518,3300	0,001233	1,190		7,39
0,90	27223,1700	0,000250	1,141		11,21

Таблица 2 – Результаты численных исследований кольцевой пластины с жестким опиранием по внешнему и шарнирным опиранием по внутреннему контуру

r/R	Круговая частота основного тона, ω (c^{-1})	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	$K=W_0 \omega^2/(q/m)$	$K_{теор}=W_0 \omega^2/(q/m)$ на основе аналитических W_0 и ω	Отклонение K от $K_{теор}$ (%)
0	431,4723	1,163530	1,334	1,285	-3,81
0,05	411,8398	1,271080	1,328		-3,35
0,10	421,7641	1,208450	1,324		-3,04
0,15	452,1631	1,045300	1,316		-2,41
0,20	496,7357	0,865008	1,314		-2,26
0,25	554,8394	0,691608	1,311		-2,02
0,30	628,4426	0,533468	1,297		-0,93
0,35	721,3527	0,406413	1,302		-1,32
0,40	839,7525	0,298754	1,297		-0,93
0,45	993,0492	0,211748	1,286		-0,08
0,50	1195,8680	0,147272	1,297		-0,93
0,55	1470,7380	0,096412	1,284		0,08
0,60	1854,7650	0,060741	1,287		-0,16
0,65	2414,0150	0,035950	1,290		-0,39
0,70	3274,0520	0,018756	1,238		3,66
0,75	4693,9030	0,009436	1,280		0,39
0,80	7279,1670	0,003692	1,205		6,23
0,85	12335,8200	0,001170	1,096		14,71
0,90	28400,3100	0,000229	1,137		11,52

По результатам исследования кольцевой пластины построены графики изменения прогибов и частот колебаний в зависимости от соотношения внутреннего и внешнего радиуса r/R (рисунок 3). При постановке опоры в центр круглой пластины, а также при подкреплении внутреннего контура кольцевой пластины характер деформаций и форма поперечных колебаний соответствует деформированию однопролётной балки с соответствующими граничными условиями. Анализ данных показывает, что при соотношении $r/R \leq 0,8$ фундаментальная зависимость (1) выполняется.

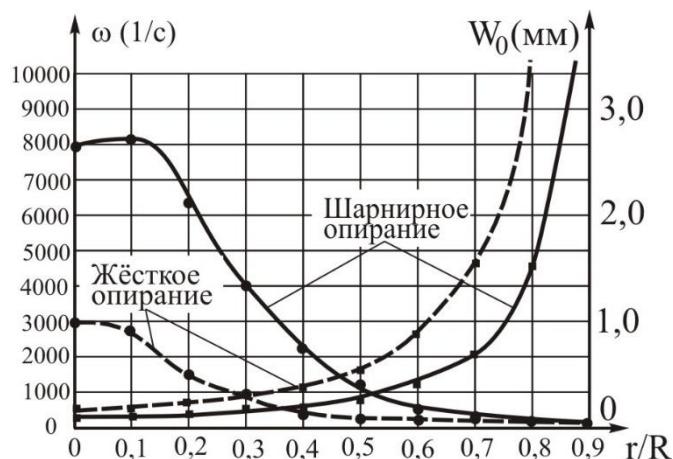


Рисунок 3 – Изменение частот собственных колебаний и прогибов кольцевой пластины в зависимости соотношения r/R

Выводы

В результате исследований подтверждена фундаментальная зависимость (1) для кольцевых изотропных пластин с однородными граничными условиями на внешнем и внутреннем контуре. Результаты численных исследований показали хорошее совпадение по коэффициенту K . Максимальное расхождение численных и аналитических значений достигает 5,53% при соотношении $r/R \leq 0,8$. В основном расхождения не превышают 3%, причём ошибка нарастает с уменьшением соотношения $r/R \leq 0,8$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробко В.И. Об одной "замечательной" закономерности в теории упругих пластинок // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1989. № 11. С. 32-36.
2. Коробко В.И., Турков А.В., Калашникова О.В. Поперечные колебания, прогибы и усилия в однопролётных составных балках с различными граничными условиями слоев // Строительная механика и расчет сооружений. 2010. № 3. С. 65-68.
3. Коробко В.И., Бояркина О.В. Взаимосвязь задач поперечного изгиба и свободных колебаний треугольных пластинок // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2007. № 22 (94). С. 24-26.
4. Турков А.В., Жу픽ова К.А. Взаимосвязь максимальных прогибов и частот собственных колебаний изотропных кольцевых пластин при шарнирном опирании по внешнему контуру // Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и архитектуры: сборник материалов XX международной научно-технической конференции. Тула, 28-29 июня 2019. Тульский государственный университет. С. 299-302. URL: http://dmitriy.chiginskiy.ru/publications/files/Materialy_XX_MNTK-2019_Tula.pdf (дата обращения: 21.05.2020).
5. Турков А.В., Жу픽ова К.А. Взаимосвязь максимальных прогибов и частот собственных колебаний изотропных кольцевых пластин при жестком закреплении по внешнему контуру // Актуальные проблемы современной когнитивной науки: сборник статей по итогам всероссийской научно-практической конференции. Волгоград. 30 июня 2019. Стерлитамак: АМИ, 2019. С. 70-72. URL: https://www.elibrary.ru/ip_restricted.asp?rpage=https%3A%2F%2Fwww%2Eelibrary%2Eru%2Fitem%2Easp%3Fid%3D38301055 (дата обращения: 21.05.2020).

6. Турков А.В., Марфин К.В., Баженова А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний составных многослойных квадратных изотропных пластин с шарнирным опиранием по контуру при изменении жесткости связей сдвига // *Строительство и реконструкция*. 2019. № 4 (84). С. 64-69.
7. Ржаницын, А.Р. Составные стержни и пластинки. М.: Стройиздат, 1986. 316 с.
8. Филатов В.В. К расчету составных пластин по теории А.Р.Ржаницына. // Труды международной научно-технической конф. "Вычислительная механика деформируемого твердого тела". Москва: МИИТ, 2006. Том 2. С. 414-416.
9. Филатов В.В., Мусса Сали. Об учете податливости поперечных связей в расчетах составных пластин по теории // *Промышленное и гражданское строительство*. 2010. №2. С. 28-29.
10. Fabien Marchetti, Kerem Ege, Quentin Leclère, N. B. Roozen On the structural dynamics of laminated composite plates and sandwich structures; a new perspective on damping identification // *Journal of Sound and Vibration*. Volume 474, 26 May 2020, 115256
11. Han-Gyu Kim, Richard Wiebe Numerical investigation of stress states in buckled laminated composite plates under dynamic loading // *Composite Structures*. Volume 235, 1 March 2020, 111743

REFERENCES

1. Korobko V.I. Ob odnoi «zamechatelnoi» zakonomernosti v teorii uprugih plastinok [About one "remarkable" regularity in the theory of elastic plates]. *Izv. Vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura*. 1989. No. 11. Pp. 32-36.
2. Korobko V.I., Turkov A.V., Kalashnikova O.V. [Shear vibrations, deflections and forces in single-span composite beams with different boundary conditions of layers]. *Structural mechanics and calculation of structures*. 2010. No. 3. Pp. 65-68.
3. Korobko V.I., Boyarkina O.V. Vzaimosvyaz' zadach poperechnogo izgiba i svobodnykh kolebanij treugol'nykh plastinok [The relationship between the problems of transverse bending and free vibrations of triangular plates]. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Building and architecture*. 2007. No. 22 (94). Pp. 24-26.
4. Turkov A.V., Zhupikova K.A. Vzaimosvyaz' maksimal'nykh progibov i chastot sobstvennykh kolebanij izotropnykh kol'tsevykh plastin pri sharnir-nom opiranii po vneshnemu konturu [The relationship of maximum deflections and natural vibration frequencies of isotropic annular plates with hinged support along the outer contour]. Actual problems of construction, construction industry and architecture: collection of materials of the XX international scientific and technical conference. Tula, June 28-29, 2019. Tula State University. Pp. 299-302. URL: http://dmitriy.chiginskiy.ru/publications/files/Materialy_XX_MNTK-2019_Tula.pdf (date accessed: 05/21/2020).
5. Turkov A.V., Zhupikova K.A. Vzaimosvyaz' maksimal'nykh progibov i chastot sobstvennykh kolebanij izotropnykh kol'tsevykh plastin pri zhestkom zakreplenii po vneshnemu konturu [The relationship between the maximum deflections and natural vibration frequencies of isotropic annular plates with rigid fastening along the outer contour]. Actual problems of modern cognitive science: collection of articles on the results of the All-Russian scientific-practical conference. Volgograd. June 30, 2019. Sterlitamak: AMI, 2019.S. 70-72. URL: https://www.elibrary.ru/ip_restricted.asp?rpage=https%3A%2F%2Fwww%2Eelibrary%2Eru%2Fitem%2Easp%3Fid%3D38301055 (date accessed: 05/21/2020).
6. Turkov A.V., Marfin K.V., Bazhenova A.V. [Deflections and natural frequencies of composite multilayer square isotropic plates with hinged support along the contour when the stiffness of shear links changes]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2019. No. 4 (84). Pp. 64-69.
7. Rzhantsyn A.R. Sostavnyye stержni i plastinki [Composite rods and plates]. Moscow: Stroyizdat, 1986.316 p.
8. Filatov V.V. K raschetu sostavnykh plastin po teorii A.R. Rzhantsyna [To the calculation of composite plates according to the theory of A.R. Rzhantsyn]. Proceedings of the international scientific and technical conference. "Computational Mechanics of Deformable Solid". Moscow: MIIT, 2006. Vol. 2.P. 414-416.
9. Filatov V.V., Moussa Sali. Ob uchete podatlivosti poperechnykh svyazey v raschetakh sostavnykh plastin po teorii [On the account of the compliance of cross-links in the calculations of composite plates according to the theory]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2010. No. 2. Pp. 28-29.
10. Fabien Marchetti, Kerem Ege, Quentin Leclère, N. B. Roozen On the structural dynamics of laminated composite plates and sandwich structures; a new perspective on damping identification. *Journal of Sound and Vibration*. Volume 474, 26 May 2020, 115256
11. Han-Gyu Kim, Richard Wiebe Numerical investigation of stress states in buckled laminated composite plates under dynamic loading. *Composite Structures*. Volume 235, 1 March 2020, 111743

Информация об авторах

Турков Андрей Викторович

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», Орёл, Россия,
доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций и материалов.

E-mail: aturkov@bk.ru

Иванушкина Кристина Александровна

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», Орёл, Россия,
Студент магистратуры

E-mail: k.zhupikova@mail.ru

Information about authors

Turkov Andrey V.

Oryol state University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia,
doctor of Technical Sciences, Department of "Construction structures and materials."

E-mail: aturkov@bk.ru

Ivanushkina Kristina A.

Oryol state University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia,
master's degree student.

E-mail: k.zhupikova@mail.ru

A.V. ALEKSEYTSSEV¹¹Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

OPTIMAL DESIGN OF STEEL FRAME STRUCTURES SUBJECT TO LEVEL OF MECHANICAL SAFETY

Abstracts. *The approach to the design of steel frame structures is considered, taking into account the potential risk of occurrence of emergencies associated with their mechanical local damage, and possible material losses. It is proposed to classify these systems according to the safety level of the solution. In accordance with the introduced classification, methods for finding solutions are proposed based on the use of evolutionary modeling with subsequent risk assessment from the onset of an emergency. These methods include a combination of two-level stochastic optimization procedures. At the first level, a search is performed on discrete sets of design parameters of a design variant with a minimum cost. As constraints in the absence of emergencies, regulatory requirements of limit states are accepted, and the strength ratio is regulated. In a possible emergency for the construction is considered a limitation on survivability. At the second level, a heuristic search is performed for the design variant for which the risks of receiving material damage from an accident are minimal while ensuring a minimum of capital investments on the considered stages at building life cycle. Examples of the steel frame design with different levels of safety are given, which demonstrate the efficiency of the proposed approach.*

Keywords: *evolutionary modeling, accident risks, mechanical safety, survivability, optimization, strength, stiffness, steel frames, building life cycle, emergency actions.*

А.В. АЛЕКСЕЙЦЕВ¹¹Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ РАМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ УРОВНЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Аннотация. *Рассмотрен подход к проектированию стальных рамных конструкций с учетом потенциального риска наступления аварийных ситуаций, связанных с их механическими локальными повреждениями, и возможных при этом материальных потерь. Предлагается классифицировать эти системы по уровням безопасности проектного решения. В соответствии с введенной классификацией предлагаются методы поиска решений, основанные на применении эволюционного моделирования с последующей оценкой риска от наступления аварийной ситуации. Эти методы включают совокупность двухуровневых процедур стохастической оптимизации. На первом уровне выполняется поиск на дискретных множествах параметров проектирования варианта конструкции с минимальной стоимостью. В качестве ограничений при отсутствии аварийных ситуаций принимаются нормативные требования предельных состояний, при этом регулируется запас прочности. В возможной аварийной ситуации для конструкции рассматривается ограничение по живучести. На втором уровне выполняется эвристический поиск того варианта конструкции, для которого риски получения материальных ущербов от аварии являются минимальными при одновременном обеспечении минимума капитальных вложений на рассматриваемых этапах жизненного цикла здания. Приведены примеры проектирования стальной рамы с различными уровнями безопасности, которые демонстрируют работоспособность и эффективность предлагаемого подхода.*

Ключевые слова: *эволюционное моделирование, риски аварии, механическая безопасность, живучесть, оптимизация, прочность, жесткость, стальные рамы, жизненный цикл, за-проектные воздействия.*

Introduction

In modern socio-economic day-to-day realities, the objective of materials saving can be relevant only while ensuring the safety of buildings. The spate of accidents at construction sites associated with man-made impact, including terrorist attacks, domestic negligence, industrial errors, poses the problem of minimizing losses in emergency situations for researchers and designers. One of the quantitative measures giving a comprehensive assessment of the severity of such losses is the risk of an emergency occurrence. The subject of research in the direction of structures calculation taking into account the risk both several decades ago and now is especially relevant. The foundations of this theory, its development and application to various types of structures and structural systems in domestic construction science were laid in the works [1-5] and many others. Foreign scientists are also conducting active research in this field. A number of works [4, 6, 7] are devoted to the search for rational options and the frequency of measures to maintain the functional performance of a structure. Many researches are deal with the risk assessment both in the course of normal operation and when occurring various scenarios of emergency actions [6, 8-14], etc. Among them there are considered wind loads [14], seismic loads [6, 7, 9, 10], and the damage of individual basic (key) structural members [15-21]. An accident risk assessment is performed for corrosion-damaged reinforced concrete [19, 20] and steel [21] structures. When assessing risks, both the overall life cycle of a building and its individual part can be considered [4, 7]. The research level achieved today makes it possible to solve the urgent problem of the optimal design of load-bearing structures considering the specified level of their safety. We know the works those are dedicated to finding optimal solutions for structures with minimal cost. In this case, the probability of failure in structures and, as a consequence, the possible consequences of accidents are not taken into account. The decreasing in the bearing capacity of the elements can lead to significant risks of failures and cannot be considered objectively as the optimum solution throughout the life cycle of the facility. This article proposes an approach to solving this problem for steel structures based on a set of methods that allow obtaining an optimum design solution in terms of cost / risk ratio. Evolutionary modeling is used as a tool for searching solutions at intermediate stages of the computational process [22, 23].

Problem definition

The steel frame system is considered, which is operated under normal conditions. When assessing the stress-strain state of this structure, taking into account only regulatory requirements. When assessing the risks of material losses, possible emergencies associated with local damage to the supports or their parts, as well as failures due to the statistical nature of the physical and mechanical characteristics of the materials and the variability of the loads, are considered. Let us introduce the following safety levels of the design solution: I - minimum, II - medium, III - high. The criterion for classifying the structure to the level of safety is the value of the “danger” of investment, estimated by relative risk:

$$\zeta_s = \sum_{i=1}^n (R_i / C_i), i \in [1..n], \quad (1)$$

where R_i – is an indicator of the absolute risk of an emergency occurrence, accompanied by financial loss; C_i – is the amount of the capital investments; i – is the number of the life cycle stage; n – is the number of such stages considered in the risk assessment.

When assessing the stress-strain state of the structures, we take into account the active constraints for strength and stability of the frames, structural rigidity and flexural stability for girders. The local stability of the flanges and webs of the open section rods is a passive constraint (it is checked outside the main computing process). The search for solutions for which the calculation of the value ζ_s is performed with a set of sizes and types of the frame sections using the modification

of the genetic algorithm [23].

Methods

To obtain a design solution with the target safety level, it is necessary to perform the following sequence of actions:

1. Performing an optimal search for a solution considering the normal operation and risks associated with failures of structural members as a result of statistical variability of materials and existing loads. For this, it is necessary to form a discrete set of a parameter that regulates the value of the structural safety reserve. Such a parameter can be the permissible equivalent stress determined by the designer $\sigma = \{\sigma_1, \dots, \sigma_e\}$, where e – is an integer number of values of the permissible stress. It is obvious that any of the permissible stresses should not exceed the design resistance of the structure. Then for each of the elements of the set σ it is necessary to perform the following steps:

- parametric synthesis of the structure using the discrete sets of variable parameters with constraints on the considered stress from the set σ . The algorithm for such a synthesis is described in the section of the evolutionary model for finding a solution given below in this paper;
- calculation of the probability of structural members failure;
- calculation of financial loss associated with an emergency in case of the failure;
- determination of the number of considered stages of the structure life cycle and calculation of relative risks.

After that for the obtained structure options, the minimum value of $F = C + pr$ is determined. Here C is the cost of the structure, r is the amount of the financial loss associated with its failure, p the probability of failure. The structure for which the value F is minimal will be rational in terms of costs and risks. For this structure, value ζ_s is calculated.

2. Assessment of the risk of accidents resulting from local damages. Initially, possible damage scenarios is considered. We will form them proceeding from the following: the main scenario (A) is a quick failure of the construction of one support. Such a scenario is already included in some design standards for reinforced concrete structures. We also consider additional scenarios (B, C ...): partial or complete damage to one of several supports together with the failure of one support.

To assess the risks resulting from emergency actions, we will follow these steps:

- analysis of dynamics of the damaged system. Two ways are possible here. With a simplified approach, it is possible to calculate dynamic coefficients for each of the possible options for local damage. For this, it is convenient to use the method of G.A. Geniev [16]. If a detailed study of the stress-strain state is required, then a damaged system can be calculated using approaches involving the analysis of local calculation schemes, for example [26], or other methods implemented in software systems. Such calculations take into account possible non-linear effects and loss of stability;

- parametric synthesis of design solutions subject to the constraints of the survivability of the structure with emergency damage effects. The survivability criterion is defined in works [17, 18]. For the frame structures, we consider the survivability provided if the conditions are met:

$$f_{tot} \leq [f]_{np}, \mathcal{E} \leq \mathcal{E}_{np}, \quad (2)$$

where f_{tot} – is the maximum displacement in the damaged structure after damping oscillations; $[f]_{np}$ – is the limiting displacement (deflection) of the structure, set by the designer due to the condition of ensuring the possibility of evacuation of people and equipment; \mathcal{E} – is maximum relative deformation in the structure material under uniaxial tension; \mathcal{E}_{np} – is ultimate plastic deformation of the material.

Essentially, conditions (2) mean the prevention of relatively large changes in the geometry

of the damaged structure, and the formation of plastic hinges in it during deformation is allowed. For steel structures, the condition $\varepsilon \leq \varepsilon_{np}$ means preventing the formation of cracks. Survival loss is approximately determined by us as a violation of one of the inequalities of condition (2).

If the structure does not have survivability during the implementation of any or all of the damage options from scenario A beyond the design basis effects, then it belongs to safety level I, if it does, then to level II. When providing survivability for one or more options of scenarios B, C, etc. - safety level is III.

- calculation of the risks of an emergency occurrence according to scenarios of emergency actions. In calculating these risks, we will consider the financial loss. In the general case, the total risk because of the occurrence of accidents consists of the risks calculated for each stage of the life cycle:

$$R_{tot} = (p_{C1}^A U_{C1}^A + \dots + p_{Cn}^A U_{Cn}^A) + \dots + (p_{C1}^m U_{C1}^m + \dots + p_{Cn}^m U_{Cn}^m), \quad (3)$$

where p_{C1}^A – is the conditional probability of the emergency damage occurrence under scenario A from m group of scenarios, provided that it is implemented at the stage $C1$ of the life cycle consisting of n stages; U_{C1}^A – is the financial loss owing to the local damages under scenario A at the stage $C1$.

The remaining values in the formula have a similar interpretation. If the right-hand side for R_{tot} attributed to the corresponding capital investments at the stages of the life cycle, then we get the value ζ_s .

3. The choice of the optimum design solution with the specified level of mechanical safety. For structures with safety level I, the design solution will be optimum if the conditions $F = C + pr \rightarrow \min$, described in paragraph 1 are met. To select the optimum design solution from the point of view of safety at levels II and III, one should consider as many hazardous options as possible from the point of view of loss of survivability of local damage. That structure variant that has survivability for any kind of emergency actions related to the corresponding group of scenarios (A, B ... etc.) will be optimum from the point of view of safety. Obviously, this option will not have a cost close to the cost of the structure, designed on the basis of the traditional approach.

When analyzing the design options that are survivable when implementing the number v_s of emergency actions from the considered group of scenarios, but do not have survivability when implementing other variants from this group, the risk value should be adjusted. For this, a coefficient of $k = v_s / v_{tot}$ is introduced, v_{tot} – is the total number of local damage options in the scenario. The risk is adjusted by dividing by this coefficient.

4. The evolutionary model of finding a solution.

In the case of designing separate relatively simple constructions, it is advisable to use a modification of a simple genetic algorithm containing such computational procedures:

- generation of the initial group of design solutions using a discrete set of variable parameters of the sections of the frames. These sets are defined by integral geometric characteristics. For steel structures, these values are selected by assortment or calculated by direct calculation, and for reinforced concrete structures, these characteristics are reduced to concrete using a coefficient that reflects the ratio of the elastic moduli of concrete and reinforcement.

- then the iterative process begins, including work with two groups of design solutions. The first group contains current solutions (CS) that are changed during the evolutionary search, and the second group contains the best or elite solutions (ES). During the iteration process, the following steps are performed:

- the structure efficiency check, taking into account the established constraints for strength, rigidity, stability. In this case, the calculation is performed on the basis of the finite element method or on the basis of mathematical models set forth in the design standards;

- editing an ES group according to the conditions for including the best solutions and exclusion of the worst ones (elitism strategy) [22];

- modifications of the CS group by genetic operators.

As genetic operators from a variety of their diversity, we use single-point crossover and mutation.

- checking the condition for termination of the search.

The criterion for ending the iterative process is the absence of change in the ES group for several tens or hundreds of iterations. This number is established empirically depending on the total number of possible structure options. If the search termination condition is fulfilled, then after satisfying the passive constraints, we consider the solution obtained. If not, a new iterative process cycle begins. If passive constraints are not fulfilled, then the evolutionary search process must be repeated by correcting the set of variable parameters.

Results and discussion

Example 1. Design of a double-span steel frame of the first (I) safety level. The considered frame structure (figure 1) consists of welded rods of the I-beam section.

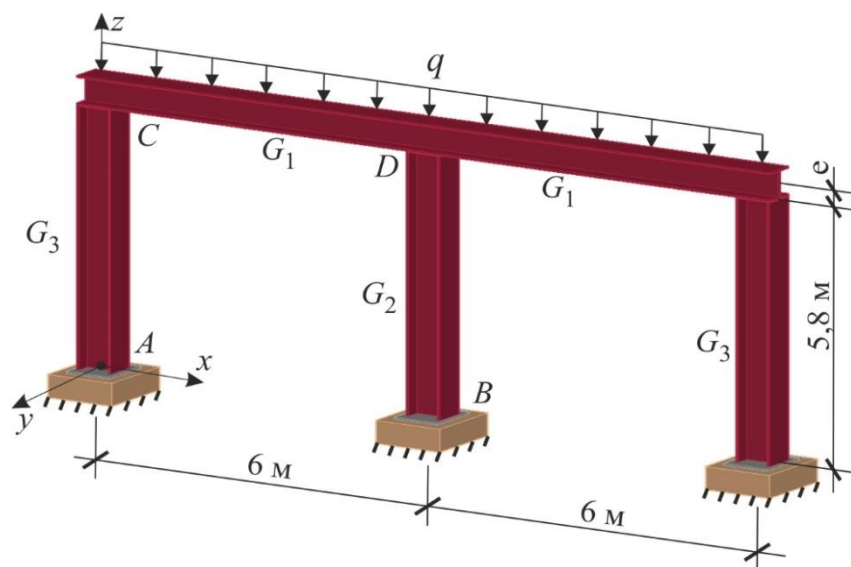


Figure 1 –The steel frame of the structure

The supporting nodes are considered as hinged ones, the other ones are rigid. The frame is made of structural steel C245. Elemental load on beams is $q = 90$ kN/m. The support assembly units are hinged-fixed. In the process of parametric synthesis, combinations of sizes of welded I-beam sections of the rods were varied. Moreover, within each group G_1, G_2, G_3 the cross-section of the rods is assigned the same. The grouping takes into account the symmetry conditions of the object relative to the vertical axis. For the beams of the frame, the permissible profiles for selection in sections are shown in the table 1, for - columns in table 2.

The conditions of strength and stiffness were taken into account in accordance with the requirements of the code of SP 16.13330.2017. The calculation is performed according to the finite element method, discretizing the object into spatial rod elements of 1 m long for girders and 1.16 m long for racks. When varying the parameters, the change in the height H of the profile was taken into account by the size $e = H/2$ of the vertical rigid insert for the finite elements of the beam.

The structure at two stages of the life cycle is considered: erection (E) and operation (O). When calculating the risks associated with failures caused by the variation of mechanical characteristics, the methodology was used [24]. Statistical data on the variation of the mechanical characteristics of structural steel was obtained according to the data of the supplier plant, according to the

loads by the method of statistical tests. For normally distributed values of the calculated resistance R_y and load q the dispersions $S_R = 7,8$ MPa, $S_q = 3,5$ kPa are calculated. When calculating financial loss, we take into account the cost of damaged frame elements and the presence of equipment worth 1 million rubles in each of its span. The cost of the beams material, taking into account welding work, is accepted 60,000 cu for 1 t. The set is formed: $\sigma = \{80, 120, 160, 200, 235\}$. For each of the elements of this set, is performed a parametric synthesis of the structure based on the evolutionary model of finding a solution by the criterion of minimizing the cost (p.4).

Table 1 – Permissible combinations of beams cross-sectional sizes

Combination mark	The cross-section shape	Размеры, см			
		h_1	δ_1	h_2	δ_2
W1		16	2,0	15	0,8
W2		20	2,0	18	0,8
W3		25	3,0	20	1,0
W4		28	3,0	25	1,0
W5		30	3,0	27	1,0
W6		32	3,0	29	1,0
W7		34	3,0	31	1,0
W8		36	3,5	33	1,2
W9		38	3,5	35	1,2
W10		40	4,0	36	1,2
W11		42	4,0	38	1,2
W12		46	4,0	42	1,4
W13		50	4,0	46	1,4
W14		55	5,0	50	1,6
W15		60	5,0	55	1,8

Table 2– Permissible combinations of column cross-sectional sizes

Combination mark	The cross-section shape	Dimensions, cm			
		h_1	δ_1	h_2	δ_2
W1	Welded I-beam (table1)	16	2,0	15	0,8
W2		20	2,0	18	0,8
W3		25	2,0	20	1,0
W4		28	3,0	25	1,0
W5		30	3,0	27	1,0

Moreover, for the final options based on the finite element method, we check the overall stability of the facility. The obtained solutions are presented in table 3.

Table 3 - Results of an optimal search for frame assigned to safety level I

Project No.	σ , MPa	C , c.u.	pr , c.u.	Combination mark for the group		
				G_1	G_2	G_3
D1	80	220631	$2,1 \cdot 10^{-2}$	9	2	W1
D2	120	174345	0,67	W7	W1	W1
D3	160	158519	9,52	W5	W1	W1
D4	200	150607	2133	W4	W1	W1
D5	235	137607	843686	W3	W1	W1

Obviously, in this case, under the abstract condition of zero probability of emergency actions for the first level of safety, the solution D4 will be the most rational. A further desire to reduce material consumption leads to a significant increase in the risk of failure, see solution D5 table 3.

If local damage effect occurs, then this solution will have even greater risks, and obviously, to increase the level of structure safety, an additional increase in the material consumption of the system is required.

Example 2. Design of the structure of II and III safety levels. We form scenarios of local structural damage. For an object of safety level II, in the case of a calculation with the main survivability constraint, we provide the following options for local damage (scenario S1):

- exclusion of the support *A* (see figure 1);
- exclusion of the support *B*.

The destruction of the joints *C* and *D* for this structure is considered conditionally equally hazardous to the corresponding damage to the supports. An object of safety level III must maintain the survivability property during the implementation of scenario S1 and such emergency actions (scenario S2):

- exclusion of the support *A* and the single support connection of the support *B* in the *x*-axis direction of the global coordinates (see figure 1);
- exclusion of the support *B* and the single support connection of the support *A* in the *x*-axis direction of the global coordinates. When considering other options for excluding support connections, the system either turned out to be geometrically variable, or these schemes were similar in degree of danger.

When assessing the stress-strain state of objects with local damage, we restrict ourselves to the quasi-static method for taking into account dynamic effects on the basis of the method proposed in the paper [25]. The analysis of the static states of the frame under consideration showed that for all types of local damages, the dynamics coefficient turns out to be close to 2.0. Therefore, we perform the stage of parametric synthesis of the damaged structure with the value of the effective load of 180 kN/m. In this case, the formation of plastic hinges in the rods was allowed, and the maximum displacements of the damaged system were limited to 300 cm, which ensured a free span of 2.8 m, ensuring the evacuation of people and equipment. The design schemes of objects and those obtained as a result of parametric synthesis of the grade of rod sections in cases of their local damage are shown in figure 2.

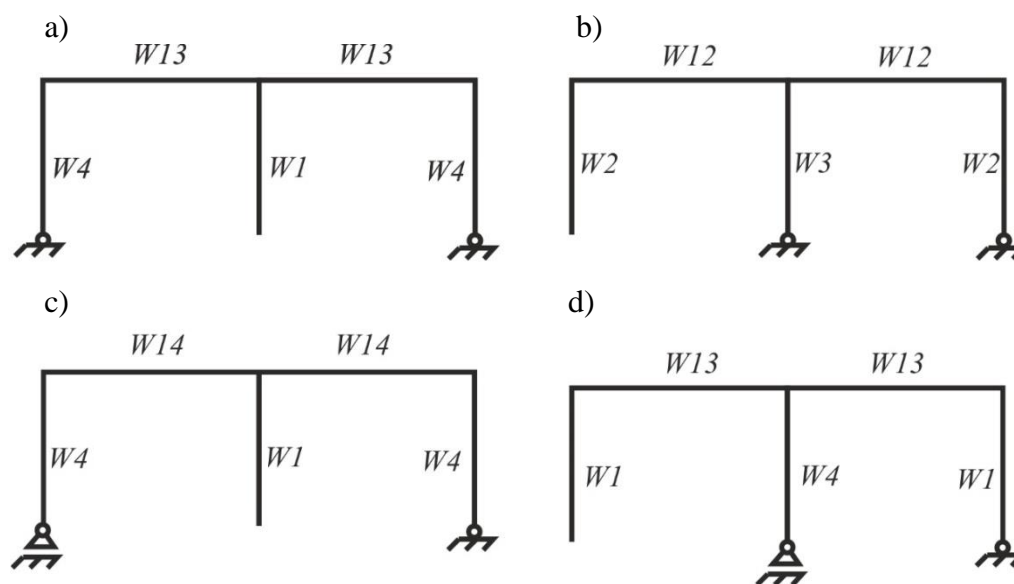


Figure 2 – The results of calculations for local damages in the implementation of scenario S1 (a, b) and scenario S2 (c, d)

As a result of the analysis of figure 2, we obtain solutions with survivability under any effect within the framework of the specified level of safety (see table 4). When calculating the risks for an object of I, II, III safety levels, empirically selected values of the probabilities of emergency actions presented in tables 5, 6, 7 were taken into account.

Table 4 – The results of parametric synthesis

Project No.	Safety level	C, c.u.	Combination mark for the group		
			G ₁	G ₂	G ₃
DS1	II	361147	W13	W3	W4
DS2	III	461523	W14	W4	W4

Table 5 – Estimated probabilities for calculating the risks of accidents at projectD4 (I safety level)

Failure Scenario	<i>p</i>	<i>p</i> (O)	<i>p</i> (E)	Conditional probability	
Normal operation S0	10 ⁻⁸	0,05	0,05	<i>p</i> (O S0) ≈ 0	<i>p</i> (E S0) ≈ 0
Scenario S1	0,(3)	1	0,05	<i>p</i> (O S1) = 0,47	<i>p</i> (E S1) = 0,23
Scenario S2	0,(3)	1	0,05	<i>p</i> (O S2) = 0,47	<i>p</i> (E S2) = 0,23

The following designations are used in the tables: *p* –probability of the accident; *p*(O), *p*(E) – the probability that any event from the group of failure scenarios is realized at the stage of operation (O) or erection (E) of the life cycle; *p*(O|S0) –the conditional probability that the accident from scenario S0 (if it is successfully implemented) will occur precisely at stage (O).

Table 6– Estimated probabilities for calculating the risks of accidents at projectDS1 (II safety level)

Failure Scenario	<i>p</i>	<i>p</i> (O)	<i>p</i> (E)	Conditional probability	
Normal operation S0	≈ 0	≈ 0	0,05	<i>p</i> (O S0) = 0	<i>p</i> (E S0) = 0
ScenarioS1	10 ⁻⁶	≈ 0	0,05	<i>p</i> (O S1) = 0	<i>p</i> (E S1) = 0
ScenarioS2	0,(3)	1	0,05	<i>p</i> (O S2) = 0,5	<i>p</i> (E S2) = 0,5

Table 7– Estimated probabilities for calculating the risks of accidents at projectDS2 (III safety level)

Failure Scenario	<i>p</i>	<i>p</i> (Э)	<i>p</i> (B)	Conditional probability	
Normal operation S0	≈ 0	≈ 0	0,05	<i>p</i> (O S0) = 0	<i>p</i> (E S0) = 0
ScenarioS1	≈ 0	≈ 0	0,05	<i>p</i> (O S1) = 0	<i>p</i> (E S1) = 0
ScenarioS2	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	0,05	<i>p</i> (O S2) ≈ 0	<i>p</i> (E S2) ≈ 0

Since the object DS1 has survivability during the implementation of local damage from the scenario S1, the probability of significant damage is close to zero. The probability of failure in the S0 scenario is also close to zero, because the object during normal operation should have significant

safety margins. In the table 7 the probabilities of an accident for an object of level III safety are given. Object DS2 has survivability for all variants of emergency actions; therefore, the probability of the risk of an emergency in all cases is close to zero.

When calculating financial loss, the same conditions were taken into account as in example 1. During the operation of the structure, the costs of maintaining their operability were also taken into account. It was believed that the period of operation of the structure is 50 years, and the costs of maintaining the structure take place from the 5th year of operation and are equal to 8,000 cu per year. At the same time, the change in these costs over the years was taken into account. The results of the calculation of relative risks for the objects with the considered safety levels are presented in table 8.

Table 8 - Indicators characterizing the safety of design solutions

Project No.	Safety level	Relative operational risk			Relative risk during the construction phase			ζ_s
		$\frac{R(O)_{S0}}{C(O)}$	$\frac{R(O)_{S1}}{C(O)}$	$\frac{R(O)_{S2}}{C(O)}$	$\frac{R(E)_{S0}}{C(E)}$	$\frac{R(E)_{S1}}{C(E)}$	$\frac{R(E)_{S2}}{C(E)}$	
П4	I	6,3	159,8	159,8	4,3	4,3	4,3	338,8
П61	II	0	0	152	31,3	31,3	31,3	245,9
П62	III	0	0	0,1	50,4	50,4	50,4	151,3

The following legend is used in table: $R(O)_{S0}...R(O)_{S2}$ – the absolute values of the risks associated with financial losses resulting from failures at the operation stage according to scenarios S0-S2; $R(E)_{S0}...R(E)_{S2}$ – the same for the construction erection stage; $C(O)$ – the amount of capital investment, including the cost of the structure and the maintenance of its operability at the operation stage; $C(E)$ – the cost of the structure installation. The obtained structure options for the frame D4, DS1, DS2 are optimum in terms of cost-risk ratio at their safety level. Moreover, if we globalize the goal of minimizing possible risks, obviously we need to choose the project DS2. The cost of this option compared with the object D4, designed with the assumption of a significant risk in case of accidents, is 3 times higher.

Conclusions

1. A methodology for the calculation and optimum design of steel frame structures is proposed taking into account their safety level, including criteria for minimizing risks associated with possible key-elements failures leading to significant financial loss. The methodology is based on the joint application of the methods of evolutionary modeling and structural analysis subject to the constraints of ultimate conditions and survivability under emergency actions.

2. A proposal has been formed to classify the safety levels of structures, based on the calculation of the integral values of relative risk, taking into account the initial design reliability and the degree of survivability of the facility.

The considered example of the design of a steel frame confirms the operability of the proposed methodology and indicates that the design of structures of this type based on only the criterion of minimizing the cost can significantly reduce its level of safety both during normal operation and during accident conditions.

REFERENCES

1. Tamrazyan A.G. Nauchnyye osnovy otsenki riska i obespecheniya bezopasnosti zhelezobetonnykh konstruktivnykh, zdaniy i sooruzheniy pri kombinirovannykh osobnykh vozdeystviyakh [Scientific basis for risk assessment and safety assurance of reinforced concrete structures, buildings and structures with combined special effects] // Vestnik NITS Stroitel'stvo. 2018. No 1 (16). S. 106-114.
2. Nagata M., Beppu M., Ichino H. Proposal on risk assessment of reinforced concrete structures subjected to explosive loads // International Journal of Protective Structures. 2018. Vol. 8, Issue 3, pp. 407-432.

3. Makhutov N.A., Gadenin M.M., Chernyavskiy A.O., Shatov M.M. Analiz riskov otkazov pri funktsionirovaniy potentsial'no opasnykh obyektoy [Analysis of risks of failures during the functioning of potentially dangerous objects] // Problemy analiza riska. 2012. T. 9. No 3. S. 8-21.
4. Alekseytsev A.V., Bezborodov Ye.L. Evolyutsionnyy poisk parametrov sistem "protezirovaniya" derevyannykh balochnykh konstruktsey [The evolutionary search for the parameters of prosthetics systems for wooden beam structures] // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2018. No 2 (76). S. 3-11.
5. Jannadi O.A., Almishari S. Risk assessment in construction. Journal of Construction Engineering and Management. 2003, vol. 129, No 5, pp. 492-500.
6. Bezabeh M.A., Tesfamariam S., Popovski M., Goda K., Stiemer S.F. Seismic Base Shear Modification Factors for Timber-Steel Hybrid Structure: Collapse Risk Assessment Approach // Journal of Structural Engineering. 2017. – No. 10(143) art. 04017136.
7. Liu M., Wen Y.K., Burns S.A. Life cycle cost oriented seismic design optimization of steel moment frame structures with risk-taking preference // Engineering Structures. 2014. No 10(27). Pp. 1407-1421.
8. Ehsan N. Risk management in construction industry. Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology -ICCSIT. 2010, vol. 9, pp. 16-21.
9. Jough F.K.G., Sensoy S. Prediction of seismic collapse risk of steel moment frame mid-rise structures by meta-heuristic algorithms // Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 2016. Vol. 4, pp. 743-757.
10. Franchin P., Petrini F., Mollaioli F. Improved risk-targeted performance-based seismic design of reinforced concrete frame structures // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 2018. Vol. 47, pp. 49-67.
11. Miraglia S., Dietsch P., Straub D. Comparative risk assessment of secondary structures in wide-span timber structures // 11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (IC ASP). 2011. Pp. 1301-1309.
12. Nilimaa J., Hothagen A., Emborg M. Thermal Crack Risk of Concrete Structures - Evaluation of Theoretical Models for Tunnels and Bridges // Nordic Concrete Research. 2017. No. 56. Pp. 55-59.
13. Tamrazyan A.G. Snizheniye riskov v stroitel'stve pri chrezvychaynykh situatsiyakh prirodnoy i tekhnogennogo kharaktera [Reducing risks in construction in emergency situations of natural and man-made nature] / A.G. Tamrazyan, S.N. Bulgakov i dr., pod obshchey red. A.G. Tamrazyana. M.: Izd-vo ASV, 2012. 304 s.
14. Vanmarcke E., Lin N., Yau S.-C. Quantitative risk analysis of damage to structures during wind-storms: some multi-scale and system-reliability effects // Structure and Infrastructure Engineering. 2013. No. 10. Pp. 1311-1319.
15. Zhang G., Zhu G., Yuan G. Quantitative risk assessment methods of evacuation safety for collapse of large steel structure gymnasium caused by localized fire // Safety science. 2016. Vol. 87, pp. 232-242.
16. Geniyev G.A. Ob otsenke dinamicheskikh effektov v sterzhnevyykh sistemakh iz khrupkikh materialov [On the evaluation of dynamic effects in rod systems of brittle materials] // Beton i zhelezobeton. 1992. №9. S. 25-27.
17. Kolchunov V.I., Klyuyeva N.V., Androsova N.B., Bukhtiyarova A.S. Zhivuchest' zdaniy i sooruzheniy pri zaproyektnykh vozdeystviyakh [Survivability of buildings and structures under emergency action]. Moskva ASV, 2014. 208 s.
18. Travush V.I., Fedorova N.V. Survivability parameter calculation for framed structural systems // Russian journal of building construction and architecture 2017. №1. P. 6-14.
19. Fedorova N.V., Gubanova M.S. Crack-resistance and strength of a contact joint of a reinforced concrete composite wall beam with corrosion damages under loading // Russian journal of building construction and architecture. 2018. №2. Pp. 6-18.
20. Li C.-Q., Mackie R.I., Lawanwisut W. A risk-cost optimized maintenance strategy for corrosion-affected concrete structures // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2007. No. 5. Pp. 335-346.
21. Carpen L., Pohjanne P., Kinnunen P., Hakkarainen T. Corrosion risk prediction of stainless steel structures // Applied Material Research AT VTT: Internal Symposium on Applied Materials. 2006. 289 P.
22. Alekseytsev A.V. Evolyutsionnaya optimizatsiya stal'nykh ferm s uchetom uzlovykh soyedineniy sterzhney [Evolutionary optimization of steel trusses taking into account the core connections of rods] // Magazine of Civil Engineering. 2013. № 5 (40). S. 28-37.
23. Alekseytsev A.V., Kurchenko N.S. Poisk ratsional'nykh parametrov sterzhnevyykh metallokonstruktsey na os-nove adaptivnoy evolyutsionnoy modeli [Search for rational parameters of bar metal structures based on adaptive evolutionary model] // Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsey i sooruzheniy. 2011. № 3. S. 7-14.
24. Raizer V.D. Reliability of Structures: Analysis and Applications. USA, Backbone Publishing Company, 2009. 146 r.
25. Serpik I.N., Alekseytsev A.V. Optimizatsiya ramnykh konstruktsey s uchetom vozmozhnosti zaproyektnykh vozdeystviy [Optimization of frame structures, taking into account the possibility of emergency actions] // Magazine of Civil Engineering. 2013. №9(44). S. 23–29
26. Savin S.Yu., Kolchunov V.I., Emelianov S.G. Modelling of resistance to destruction of multi-storey frame-connected buildings at sudden loss of bearing elements stability // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 456 (2018) 012089.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тамразян А.Г. Научные основы оценки риска и обеспечения безопасности железобетонных конструкций, зданий и сооружений при комбинированных особых воздействиях // Вестник НИЦ Строительство. 2018. № 1 (16). С. 106-114.
2. Nagata M., Veppu M., Ichino H. Proposal on risk assessment of reinforced concrete structures subjected to explosive loads // International Journal of Protective Structures. 2018. Vol. 8. Issue 3. Pp. 407-432.
3. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Чернявский А.О., Шагов М.М. Анализ рисков отказов при функционировании потенциально опасных объектов // Проблемы анализа риска. 2012. Т. 9. № 3. С. 8-21.
4. Алексейцев А.В., Безбородов Е.Л. Эволюционный поиск параметров систем "протезирования" деревянных балочных конструкций // Строительство и реконструкция. 2018. № 2 (76). С. 3-11.
5. Jannadi O.A., Almishari S. Risk assessment in construction. Journal of Construction Engineering and Management. 2003. Vol. 129. No 5. Pp. 492-500.
6. Bezabeh M.A., Tesfamariam S., Popovski M., Goda K. Stierner S.F. Seismic Base Shear Modification Factors for Timber-Steel Hybrid Structure: Collapse Risk Assessment Approach // Journal of Structural Engineering. 2017. No. 10(143) art. 04017136.
7. Liu M., Wen Y.K., Burns S.A. Life cycle cost oriented seismic design optimization of steel moment frame structures with risk-taking preference // Engineering Structures. 2014. No 10(27). Pp. 1407-1421.
8. Ehsan N. Risk management in construction industry. Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology -ICCSIT. 2010. Vol. 9. Pp. 16-21.
9. Jough F.K.G., Sensoy S. Prediction of seismic collapse risk of steel moment frame mid-rise structures by meta-heuristic algorithms // Earthquake Engineering and Engineering Vibration. 2016. Vol. 4, pp. 743-757.
10. Franchin P., Petrini F., Mollaioli F. Improved risk-targeted performance-based seismic design of reinforced concrete frame structures // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 2018. Vol. 47, pp. 49-67.
11. Miraglia S., Dietsch P., Straub D. Comparative risk assessment of secondary structures in wide-span timber structures // 11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (IC ASP). 2011. Pp. 1301-1309.
12. Nilimaa J., Hothagen A., Emborg M. Thermal Crack Risk of Concrete Structures - Evaluation of Theoretical Models for Tunnels and Bridges // Nordic Concrete Research. 2017. No. 56. Pp. 55-59.
13. Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера / А.Г. Тамразян, С.Н. Булгаков и др.; под общей ред. А.Г. Тамразяна. М.: Изд-во АСВ, 2012. 304 с.
14. Vanmarcke E., Lin N., Yau S.-C. Quantitative risk analysis of damage to structures during wind-storms: some multi-scale and system-reliability effects // Structure and Infrastructure Engineering. 2013. No. 10. Pp. 1311-1319.
15. Zhang G., Zhu G., Yuan G. Quantitative risk assessment methods of evacuation safety for collapse of large steel structure gymnasium caused by localized fire // Safety science. 2016. Vol. 87, pp. 232-242.
16. Гениев Г.А. Об оценке динамических эффектов в стержневых системах из хрупких материалов // Бетон и железобетон. 1992. №9. С. 25-27.
17. Колчунов В.И., Клюева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М.: Изд-во АСВ, 2014. 208 с.
18. Travush V.I., Fedorova N.V. Survivability parameter calculation for framed structural systems // Russian journal of building construction and architecture 2017. №1. Pp. 6-14.
19. Fedorova N.V., Gubanova M.S. Crack-resistance and strength of a contact joint of a reinforced concrete composite wall beam with corrosion damages under loading // Russian journal of building construction and architecture. 2018. №2. Pp. 6-18.
20. Li C.-Q., Mackie R.I., Lawanwisut W. A risk-cost optimized maintenance strategy for corrosion-affected concrete structures // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2007. No. 5. Pp. 335-346.
21. Carpen L., Pohjanne P., Kinnunen P., Hakkarainen T. Corrosion risk prediction of stainless steel structures // Applied Material Research AT VTT: Internal Symposium on Applied Materials. 2006. 289 P.
22. Алексейцев А.В. Эволюционная оптимизация стальных ферм с учетом узловых соединений стержней // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 5 (40). С. 28-37.
23. Алексейцев А.В., Курченко Н.С. Поиск рациональных параметров стержневых металлоконструкций на основе адаптивной эволюционной модели // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2011. № 3. С. 7-14.
24. Raizer V.D. Reliability of Structures: Analysis and Applications. USA, Backbone Publishing Company, 2009. 146 p.
25. Серпик И.Н., Алексейцев А.В. Оптимизация рамных конструкций с учетом возможности запроектных воздействий // Инженерно-строительный журнал. 2013. №9(44). С. 23-29.
26. Savin S.Yu., Kolchunov V.I., Emelianov S.G. Modelling of resistance to destruction of multi-storey frame-

connected buildings at sudden loss of bearing elements stability // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 456 (2018) 012089.

Information about authors

Alekseytsev Anatoliy V.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

Candidate in Technical Science, Associate Professor of Department "Concrete and reinforced concrete structures".

E-mail: aalexw@mail.ru

Информация об авторах

Алексеев Анатолий Викторович

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций

E-mail: aalexw@mail.ru

М.А. ЗУБРИЦКИЙ¹, О.Ю. УШАКОВ², Л.С. САБИТОВ³

¹ООО «УралКонцептПроект», г. Екатеринбург, Россия

²ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия,

³ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань, Республика Татарстан, Россия

ОЦЕНКА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИЯХ УРОВНЯ «МАКСИМАЛЬНОЕ РАСЧЕТНОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ» НЕЛИНЕЙНЫМ СТАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Аннотация. В статье рассмотрен мультимодальный нелинейный статический метод (МНСМ) при оценке сейсмостойкости высотных сооружений. Объектом исследования является ветроэлектрическая установка высотой 80 метров. В статье предложена методика учета высших форм колебаний, а также модифицированный алгоритм поиска характеристической точки при оценке сейсмостойкости нелинейным статическим методом. Для верификации полученных результатов выполнен расчет на сейсмическое воздействие уровня «Максимальное Расчетное Землетрясение» («МРЗ») с использованием прямого динамического метода с учетом возможности развития в несущих элементах конструкции неупругих деформаций и локальных хрупких разрушений. Выполнен сравнительный анализ результатов, по результатам которого погрешность в расчетах не превышает 12%.

Ключевые слова: сейсмическое воздействие, проектное землетрясение, максимальное расчетное землетрясение, линейно-спектральный анализ, нелинейный статический метод (Pushover Analysis), прямой динамический метод, ветроэлектрическая установка.

M.A. ZUBRITSKIY¹, O.Y. USHAKOV², L.S. SABITOV³

¹ООО "UralConceptProject", Ekaterinburg, Russia

²Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin», Ekaterinburg, Russia

³Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Kazan Federal University», Republic of Tatarstan, Russia

SEISMIC RESISTANCE ESTIMATION OF HIGH-RISING STRUCTURES UNDER DUCTILITY LEVEL EARTHQUAKE BY NONLINEAR STATIC METHOD

Abstracts. The article discusses the multimodal nonlinear static method (MNSM) in assessing the seismic resistance of high-rise structures. The object of the study is a wind power plant 80 meters high. The article proposes a method for taking into account the higher forms of vibrations, as well as a modified algorithm for finding a characteristic point when assessing seismic resistance by a nonlinear static method. To verify the results obtained, the calculation for the seismic effect of the level "Maximum Design Earthquake" ("MCE") was performed using the direct dynamic method, taking into account the possibility of development of inelastic deformations and local brittle fractures in the load-bearing structural elements. A comparative analysis of the results was carried out, according to the results of which the error in the calculations does not exceed 12%.

Keywords: seismic impact, strength level earthquake, ductility level earthquake, response spectrum analysis, nonlinear static method (Pushover Analysis), time history analysis, steel structures, wind power plant.

Введение

Как правило, оценка сейсмостойкости высотных зданий и сооружений при сейсмическом воздействии уровня «Максимальное Расчетное Землетрясение» (МРЗ) выполняется во временной области с применением инструментальных или синтезированных акселерограмм. Формирование расчетных динамических моделей выполняется с учетом возможности развития в несущих элементах конструкции неупругих деформаций и локальных хрупких разрушений [1]. Данный метод наиболее точно описывает отклик системы при землетрясении, но является весьма трудоемким и требует значительных временных затрат при интегрировании уравнений движения. В последнее время значительное внимание уделяется альтернативным методом оценки сейсмостойкости, из которых наибольшее распространение получил нелинейный статический метод или Pushover-Analysis. Отклик системы вычисляется на основании нелинейного статического расчета, при котором на расчетную модель действует монотонно возрастающим инерционными силами с постоянным по высоте распределением. Критерий окончания расчета – достижение системой целевых перемещений либо ее разрушение. Предложенные системы распределения инерционных сил не учитывают влияние высших форм колебаний на общий отклик системы. В работах [2], [3], [4] для решения данной проблемы предложена изменяющаяся во времени система инерционных сил. В исследованиях [5], [6], [7] при оценке сейсмостойкости систем помимо главной формы колебаний дополнительно выполнялся Pushover-анализ, в котором система инерционных сил соответствовала высшим формам колебаний.

В работе [8] был предложен мультимодальный нелинейный статический метод («МНСМ»), позволяющий учесть необходимое количество форм высших колебаний. Предложенный метод значительно упрощает поиск характеристической точки на кривой несущей способности за счет введения понятия энергоемкости системы. В данной статье детально описан МНСМ, представлены результаты расчетов МНСМ и прямым динамическим методом для высотных сооружений – ветроэлектрических установок (ВЭУ).

Методика учета высших форм колебаний

Для определения отклика системы с учетом влияния высших форм колебаний рассмотрим следующий метод, для чего введем понятие *модифицированной системы инерционных сил*.

Под *модифицированной системой инерционных сил* будем понимать систему сил, полученную на основании суперпозиции сил методом «Корень Квадратный Суммы Квадратов» [9], при которой перемещение верха рассматриваемой расчетной модели будет соответствовать суммарным перемещениям, полученным на основании линейно-спектрального анализа. Графическое представление сложения инерционных сил выполнено на рисунке 1.

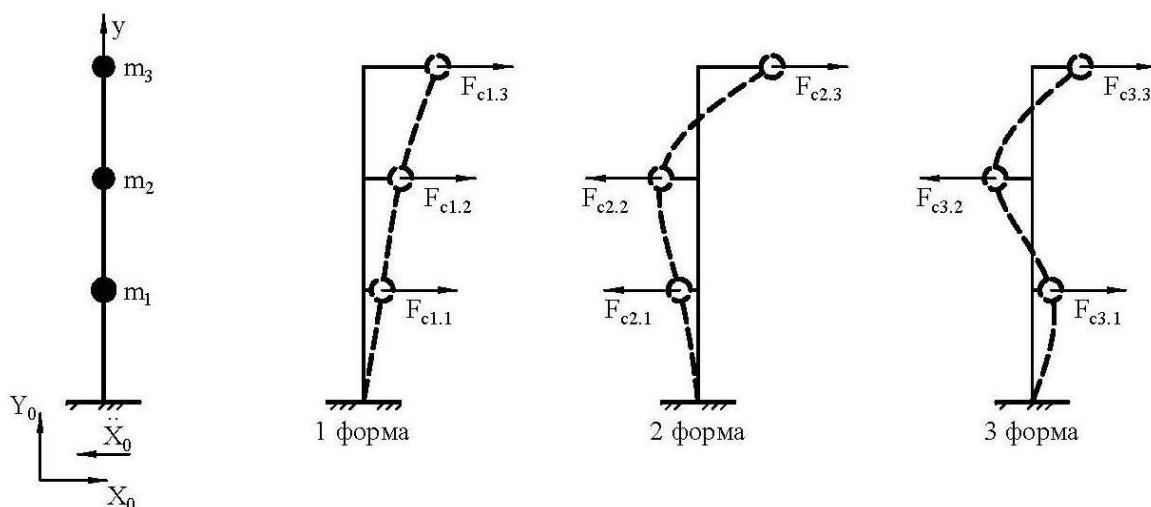


Рисунок 1 – Графическое представление метода суммирования модальных откликов «Корень Квадратный Суммы Квадратов»

Таким образом, *модифицированная система инерционных сил* определяется выражением (1):

$$R_{sum} = \alpha \left(\sum_{i=1}^n R_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

где R_i – модальный отклик конструкции, соответствующий i -й форме собственных колебаний;

$\alpha = \Delta_{RSA} / \Delta_{SRSS}$ – коэффициент редуцирования, равный соотношению максимального

перемещения верха системы Δ_{RSA} , полученного на основании линейно-спектральной теории, к перемещениям Δ_{SRSS} , полученным на основании модифицированной системы сил.

Согласно [10], [11] для разрушения материала, независимо от того, какая будет приложена нагрузка (т.е. статическое медленное загрузеие, динамическое – быстрое загрузеие, однократное или многократное), необходимо затратить одно и то же количество энергии. Таким образом, энергия деформации линейной системы с модифицированной системой инерционных сил тождественна энергии деформации системы с учетом пластических деформаций. Целевое значение энергоёмкости системы возможно определить на основании модифицированной системы инерционных сил (рисунок 2):

$$W_i = \frac{V_i \Delta_i}{2} \quad (2)$$

где V_i – сдвигающая сила в основании системы, полученная на основании линейно-спектрального анализа;

Δ_i – перемещение верха системы.

Следующим этапом оценки сейсмостойкости является построение на основании нелинейного статического расчета системы с одной степенью свободы при действии модифицированной системы инерционных сил графика зависимости «Усилие в основании V – Смещение верха системы Δ » – график несущей способности. Учитывая, что энергии упругой и упругопластической деформации равны, полученное значение перемещения верха системы Δ_{pi} является целевым значением для оценки сейсмостойкости всей системы в целом, на основании которого возможно определить междуэтажные смещения, внутренние усилия в элементах системы, а также проанализировать заупругую работы узлов и элементов системы.

В зависимости от положения характеристической точки на кривой несущей способности возможно оценить общий характер повреждения конструкции в целом.

Постановка задачи и описание расчетной модели

Современные ВЭУ - это машины, преобразующие энергию ветра в механическую энергию вращающегося ветроколеса, а затем в электрическую энергию. Общий вид таких установок представлен на фото 1.

Ветроэлектрические установки состоят из следующих основных компонентов:

- Ветроколесо (ротор), преобразующее энергию набегающего ветрового потока в механическую энергию вращения оси турбины. Диаметр ветроколеса колеблется от нескольких метров до нескольких десятков метров. Частота вращения составляет от 15 до 100 об/мин;
- Мультипликатор – промежуточное звено между ветроколесом и электрогенератором, который повышает частоту вращения вала ветроколеса и обеспечивает согласование с оборотами генератора;
- Башня (ее иногда укрепляют стальными растяжками), на которой установлено ветроколесо. У ВЭУ большой мощности высота башни достигает 100 м. Обычно это цилиндрические мачты, хотя применяются и решетчатые башни;

– Основание (фундамент).

Характеристики рассматриваемой ВЭУ представлены в таблице 1. Башня – трёх-секционная тонкостенная стержень-оболочка; толщина стенки нижней секции – $t_1=30$ мм, средней – $t_2=25$ мм и верхней – $t_3=15$ мм, башня имеет диаметр сечения по внешнему периметру внизу – $D_1= 4,3$ м, наверху – $D_2= 2,6$ м.

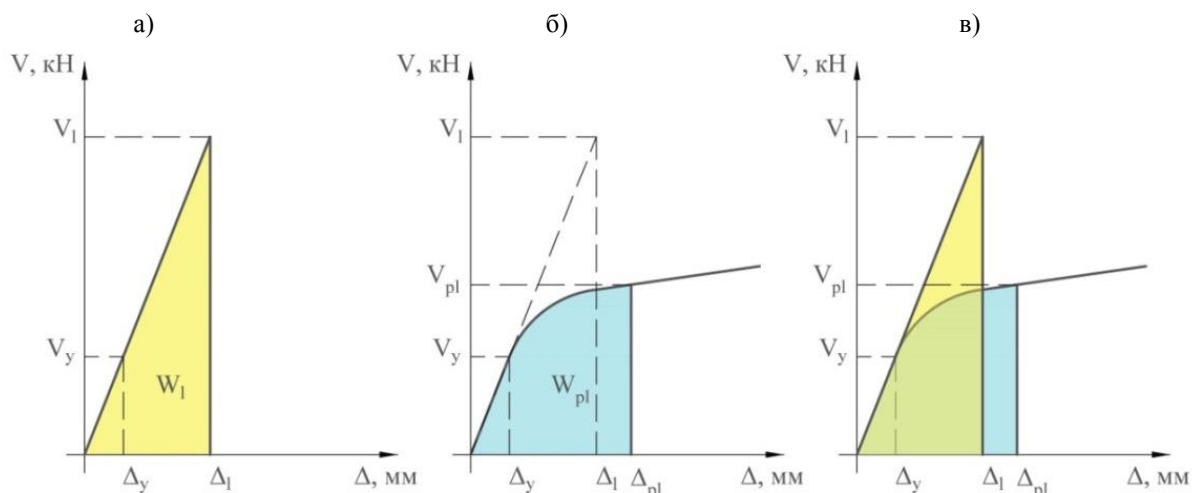


Рисунок 2 –Графическое представление метода суммирования модальных откликов «Корень Квадратный Суммы Квадратов»: а) упругая работа; б) упругопластическая работа; в) равенство энергии при упругой и упругопластической работе



Фото 1 – Ветроэлектрическая установка Acciona AW-82-1500 класса IEC IIIВ

Расчетная сейсмичность площадки строительства принята по результатам сейсмического микрорайонирования и составляет 8 баллов по шкале MSK-64. Исходное сейсмическое воздействие задано однокомпонентной акселерограммой, представленной на рисунке 3.

В качестве материала конструкций для расчетной динамической модели (РДМ) принята сталь, диаграмма деформирования которой представлена на рисунке 4. Для описания нелинейной работы элементов системы принята модель изотропного упрочнения материала (Bilinear Kinematic Hardening) [12]. Диаграммы деформирования стали при растяжении и сжатии принимают одинаковыми, с учетом нормируемых сопротивлений стали растяжению и сжатию. Поверхность текучести описывается критерием Вон-Мизеса и представляет из себя цилиндр, ось которого совпадает с осью гидростатического сжатия в осях главных напряжений.

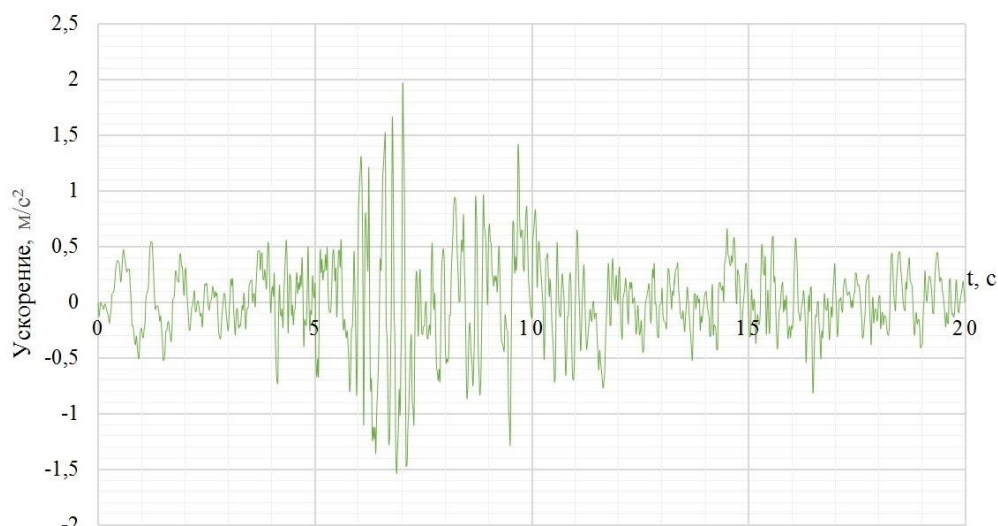


Рисунок 3 Акселерограмма горизонтальной компоненты землетрясения

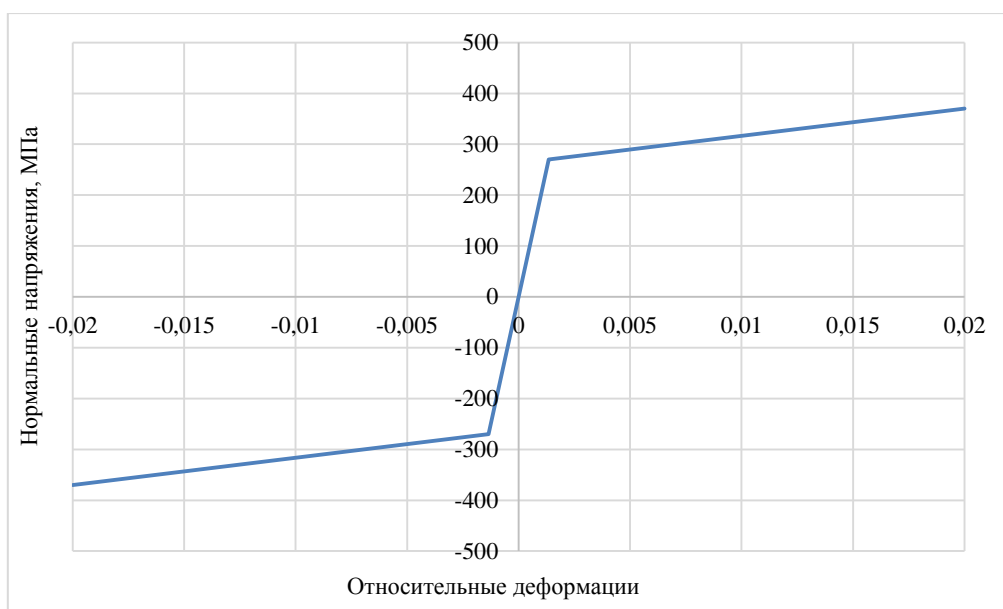


Рисунок 4 – Диаграмма деформирования стали при изотропном упрочнении

Таблица 1 – Характеристики ветроэлектрической установки

№	Наименование	Значение
1	Установленная мощность, <i>МВт</i>	1,5
2	Ометаемая площадь, <i>м²</i>	5345
3	Количество лопастей, <i>шт.</i>	3
4	Диаметр ветроколеса, <i>м</i>	82
5	Длина одной лопасти, <i>м</i>	39
6	Масса одной лопасти, <i>кг</i>	5780
7	Масса ротора, <i>кг</i>	32340
8	Масса гондолы, <i>кг</i>	52500
9	Высота башни до оси ступицы, <i>м</i>	80
10	Радиус ступицы, <i>м</i>	3,3

Жесткостные и частотные характеристики систем приведены в таблице 2. Общий вид расчетной модели представлен на рисунке 5.

Таблица 2 – Характеристики динамической модели

№	Наименование	Значение
1	Модуль деформации, Па	$2e11$
2	Предел упругости, МПа	270
3	Тангенциальный модуль деформации, МПа	$5.361e3$
4	Первая частота собственных колебаний $f1$, Гц	0.3752
5	Вторая частота собственных колебаний $f2$, Гц	0.93285
6	Третья частота собственных колебаний $f3$, Гц	2.6817
7	Параметр демпфирования α_R , c^{-1}	0.20381
8	Параметр демпфирования β_R , c	0.005131



Рисунок 5—Общий вид расчетной модели в ПК ANSYS

Анализ результатов расчета

Для оценки сейсмостойкости РДМ мультимодальным нелинейным статическим методом (МНСМ) согласно выражению (1) найдем модифицированную систему инерционных сил на основании линейно-спектрального анализа.

Полученная модифицированная система инерционных сил, коэффициенты редуцирования, сдвигающая сила в основании, энергоемкость системы, а также полученные результаты по перемещениям точек системы и внутренним усилиям представлены в таблице 3. Сопоставление результатов приведено в таблице 4.

Таблица 3 – Результаты расчета мультимодальным нелинейным статическим методом

№	Наименование	Значение
1	Инерционная сила в уровне <i>верхнего</i> узла после сложения модальных откликов, кг	12951.41
2	Инерционная сила в уровне <i>среднего</i> узла после сложения модальных откликов, кг	10218.39
3	Инерционная сила в уровне <i>нижнего</i> узла после сложения модальных откликов, кг	9419.69
4	Суммарная модальная масса учитываемых форм колебаний, %	98.689
5	Максимальные перемещения <i>верхнего</i> узла по результатам расчета на основе линейно-спектральной теории, мм	129.07
6	Максимальные перемещения <i>верхнего</i> узла при действии модифицированной системы инерционных сил, мм	217.44
7	Коэффициент редуцирования α	0.59359
8	Максимальная суммарная поперечная сила в заделке системы при действии редуцированной системы инерционных сил, кН	189.71
9	Потенциальная энергия деформации системы / Энергоемкость системы, кДж	122.42

Продолжение таблицы 3

№	Наименование	Значение
10	Максимальные перемещения <i>верхнего</i> узла системы по результатам расчета (МНСМ), мм	130.71
11	Максимальные перемещения <i>среднего</i> узла системы по результатам расчета МНСМ, мм	59.58
12	Максимальные перемещения <i>нижнего</i> узла системы по результатам расчета МНСМ, мм	16.05

Таблица 4 – Оценка погрешности МНСМ для РДМ при сейсмическом воздействии

Сравниваемый параметр		Прямой динамический метод	Нелинейный статический метод	Погрешность, %
Горизонтальные смещения, мм	<i>Верхний узел H=80 м</i>	133.99	130.71	-2.45
	<i>Средний узел H=52м</i>	56.23	59.58	+5.62
	<i>Нижний узел H=26м</i>	14.27	16.05	+11.09

Выводы

В процессе математического исследования выполнены расчеты во временной области с использованием записей ускорений, построена кривая несущей способности, выполнен нелинейный статический расчет и модальный анализ для расчетной модели несущих конструкций ветроэлектрической установки.

Для учета влияния высших форм колебаний при оценке сейсмостойкости систем использована методика поиска начальных инерционных сил для последующего нахождения характеристической точки на графике несущей способности системы – мультимодальный нелинейный статический метод. Полученные результаты сравнивались с откликом системы, полученным прямым динамическим методом. По результатам выполненного комплекса расчетов можно сделать вывод о целесообразности применения предложенной методики. Максимальная погрешность результатов расчетов не превышает 12%, обеспечивая при этом запас при оценке сейсмостойкости. Авторами предложен алгоритм, позволяющий автоматизировать предложенную методику [13].

Стоит отметить, что при меньших затратах машинного времени мультимодальный нелинейный статический метод может быть достойной альтернативой прямому динамическому методу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. М.:2014.
2. Fajfar P., Fischinger M. (1988). N2—A Method for Nonlinear Seismic Analysis of Regular Structures. Proceedings, Ninth World Conference on Earthquake Engineering. Vol. 5. Pp. 111-116. Tokyo-Kyoto, Japan.
3. Bracci, J.M., Kunnath, S.K. and Reinhorn, A.M. (1997). Seismic Performance and Retrofit Evaluation for Reinforced Concrete Structures. American Society of Civil Engineers, Journal Structural Engineering, Vol. 123. No. 1. Pp. 3-10
4. Gupta B., Kunnath S.K. Adaptive Spectra-based Pushover Procedure for Seismic Evaluation of Structures. Earthquake Spectra. 2000. Vol. 16. No. 2. Pp. 367-392, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California

5. Paret T.F., Sasaki, K.K., Eilbekc, D.H., Freeman, S.A. Approximate Inelastic Procedures to Identify Failure Mechanisms from Higher Mode Effects. Proceedings, Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1966, Acapulco, Mexico
6. Sasaki K.K., Freeman S.A., Paret T.F. Multimode Pushover Procedure (MMP)—A Method to Identify the Effects of Higher Modes in a Pushover Analysis. Proceedings, Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, Seattle, Washington, 1988.
7. Matsumori T., Otani S., Shiohara H., Kabeyasawa T. Earthquake Member Deformation Demands in Reinforced Concrete Frame Structures. Proceedings, U.S.-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering, Methodology for R/C Bldg. Structures, 1999. pp. 79-94. Maui, Hawaii.
8. Zubritskiy M.A., Ushakov O.Y., Sabitov L.S. Account for the contribution of higher modes under system seismic resistance estimation by nonlinear static method / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Volume 570. Number 1.
9. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб.:Наука, 1998. 255 с., ил. 70.
10. Мкртычев О.В., Джинчвелашвили Г.А. Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения): монография. Москва: МГСУ, 2012. 192 с. (Библиотека научных разработок и проектов МГСУ)
11. Мкртычев О.В. Безопасность зданий и сооружений при сейсмических и аварийных воздействиях: монография / ГОУ ВПО Моск. гос. строит. унив-т. М.: МГСУ, 2010. 152 с.
12. ANSYS HELP [Электронный ресурс] // URL: <https://ansyshelp.ansys.com/>
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019667065. Мультимодальный нелинейный статический метод при оценке сейсмостойкости система МРА-1. Правообладатель: Зубрицкий Максим Александрович. Авторы: Сабитов Л.С., Зубрицкий М.А., Ушаков О.Ю. Заявка 2019663503; дата гос. Регистр. В Реестре программ для ЭВМ 18.12.19 г. – 1 с.

REFERENCES

1. SP 14.13330.2014. Seismic Building Design Code. Moscow: 2014
2. Fajfar P., Fischinger M. N2—A Method for Nonlinear Seismic Analysis of Regular Structures. Proceedings, Ninth World Conference on Earthquake Engineering, 1988. Vol. 5. Pp. 111-116. Tokyo-Kyoto, Japan.
3. Bracci J.M., Kunnath S.K., Reinhorn A.M. Seismic Performance and Retrofit Evaluation for Reinforced Concrete Structures. American Society of Civil Engineers, Journal Structural Engineering. 1977. Vol. 123. No. 1. Pp. 3-10.
4. Gupta B., Kunnath S.K. Adaptive Spectra-based Pushover Procedure for Seismic Evaluation of Structures. Earthquake Spectra. 2000. Vol. 16. No. 2. Pp. 367-392. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California.
5. Paret T.F., Sasaki K.K., Eilbekc D.H., Freeman S.A. Approximate Inelastic Procedures to Identify Failure Mechanisms from Higher Mode Effects. Proceedings, Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Paper. 1996. No. 966. Acapulco, Mexico.
6. Sasaki K.K., Freeman S.A., Paret T.F. Multimode Pushover Procedure (MMP)—A Method to Identify the Effects of Higher Modes in a Pushover Analysis. Proceedings, Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, Seattle, Washington, 1988.
7. Matsumori T., Otani S., Shiohara H., Kabeyasawa T. Earthquake Member Deformation Demands in Reinforced Concrete Frame Structures. Proceedings, U.S.-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering, Methodology for R/C Bldg. Structures, 1999. Pp. 79-94, Maui, Hawaii.
8. Zubritskiy M.A., Ushakov O.Y., Sabitov L.S. Account for the contribution of higher modes under system seismic resistance estimation by nonlinear static method / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Volume 570. Number 1.
9. Birbraer A.N. Seismic Analysis of Structures. St. Petersburg: Nauka, 1998. 255 p.
10. Mkrtychev O.V., Ginchvelashvili G.A. Problems of accounting for nonlinearities in the theory of seismic resistance (hypotheses and delusions): monograph. Moscow: NRU MGSU, 2012. 92 p.
11. Mkrtychev O.V. Safety of buildings and structures during seismic and emergency impacts analysis of buildings: monograph / Moscow State University of Civil Engineering – Moscow, NRU MGSU, 2010. 152 p.
12. ANSYS HELP [Electronic resource] // URL: <https://ansyshelp.ansys.com/>
13. Certificate of state registration of the program for electronic computer №2019667065. Multimodal nonlinear static method for system seismic evaluation MPA-1. Copyright holder: Zubritskiy Maksim Aleksandrovich. The authors: Sabitov L.S., Zubritskiy M.A., Ushakov O.Y. Request 2019663503; state date registration in the electronic computer program registry 18.12.19

Информация об авторах

Зубрицкий Максим Александрович

ООО «УралКонцептПроект», г. Екатеринбург, Россия,
главный специалист.

E-mail: zubrickiy_maksim@mail.ru

Ушаков Олег Юрьевич

ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия,
к.т.н., доцент кафедры систем автоматизированного проектирования объектов строительства.

E-mail: ushakovoleg@yandex.ru

Сабитов Линар Салихзанович

ФГАОУ ВО Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Республика Татарстан, Россия,
к.т.н., доцент кафедры биомедицинской инженерии и управления инновациями.

E-mail: sabitov-kgasu@mail.ru

Information about authors

Zubritskiy Maksim A.

ООО "UralConceptProject ", Ekaterinburg, Russia
Chief Specialist

E-mail: zubrickiy_maksim@mail.ru

Ushakov Oleg U.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Ural Federal University named after the first
President of Russia B.N. Yeltsin», Ekaterinburg, Russia,

candidate in tech. sc., docent of the dep. of system of computer-aided design of construction objects.

E-mail: ushakovoleg@yandex.ru

Sabitov Linar S.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Kazan Federal University», Kazan, Republic
of Tatarstan, Russia,

candidate in tech. sc., docent of the dep. Biomedical Engineering and Innovation Management.

E-mail: sabitov-kgasu@mail.ru

ФЕДОРОВА Н.В.¹, МЕДЯНКИН М.Д.¹, БУШОВА О.Б.²¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
г. Москва, Россия² ООО «ПИК-Проект», г. Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТАТИКО-ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА ПРИ РЕЖИМНОМ НАГРУЖЕНИИ

Аннотация. Приведена методика экспериментальных исследований бетонных и железобетонных элементов с целью определения параметров деформирования бетона при его статическом нагружении до заданного уровня, с последующим однократным динамическим высокоскоростным докружением ударной нагрузкой. Испытания образцов проводятся посредством режимного статико-динамического нагружения, которое осуществляется с использованием специально разработанного устройства, позволяющего фиксировать заданный уровень статического нагружения опытного образца и догружать его с этого уровня ударной нагрузкой с заданными динамическими параметрами. Разработанная методика статико-динамических испытаний, приоритет которой защищен патентом РФ, позволяет экспериментально определять параметры диаграмм деформирования бетона такие как динамический модуль деформаций, динамическую прочность бетона, предельные деформации бетона при различных режимах рассматриваемого статико-динамического нагружения, а также изменение коэффициента динамической прочности бетона при различном уровне начальной статической нагрузки. Дан анализ результатов испытаний первой серии бетонных призм и приведены прочностные, деформативные и временные параметры для испытанных образцов, а также полученные с помощью ультразвукового прибора ПУЛЬСАР 2.1 изменения напряжений и объемных деформаций бетона при рассматриваемых режимах нагружений.

Ключевые слова: статико-динамическая прочность бетона, предельные деформации, экспериментальные исследования, методика, статико — динамическое нагружение.

N. V. FEDOROVA¹, M. D. MEDYANKIN¹, O. B. BUSHOVA²¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering,
Moscow, Russia² LLC "PIK-Project", Moscow, Russia

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE STATIC-DYNAMIC DEFORMATION OF CONCRETE UNDER LOADING MODAL

Abstracts. The method of experimental analysis of concrete and reinforced concrete elements is given in order to determine the parameters of concrete deformation under static loading to a given level, followed by a single dynamic high-speed loading by a shock load. Tests of samples are carried out by means of mode static-dynamic loading, which is carried out using a specially designed device that allows you to fix a given level of static loading of the test specimen and load it from this level by a shock load with the specified dynamic parameters. The developed method static-dynamic tests, the priority of which is protected by a patent of the Russian Federation, allows to experimentally determine the parameters for diagrams of deformation of concrete such as dynamic modulus of deformation, dynamic strength of concrete, the ultimate strain of concrete at different conditions considering static and dynamic loading, and the change of the coefficient of dynamic strength of concrete under different levels of initial static load. The analysis of test results the first series of concrete prisms and deformation the strength and time parameters for tested samples and also obtained using ultrasonic PULSAR 2.1 of stress changes and volume deformation of concrete under these modes of loading.

Keywords: static-dynamic strength of concrete, ultimate deformations, experimental studies, method, static-dynamic loading.

Введение

Известен ряд исследований [1-5], посвященных решению задач деформирования бетона при кратковременном, длительном и динамическом нагружениях. Эти и другие исследования определяют и уточняют критериальные параметры предельного состояния первой и второй групп для бетонных и железобетонных конструкций. Введение в практику проектирования нормативных требований по защите зданий и сооружений от особых аварийных воздействий [6,7] открывает необходимость анализа процесса деформирования бетонных и железобетонных конструкций, связанного с такими воздействиями, новыми их видами и режимами. Одним из возможных сценариев особого воздействия на конструктивную систему является случай, когда к конструкции, уже нагруженной эксплуатационной нагрузкой добавляется высокоскоростное динамическое догружение, вызванное гипотетическим удалением одной из несущих конструкций. Такой сценари предполагает возможность наступления критериев, определенных требованиями [6]. При этом анализ названного и других сценариев недопущения возможного локального разрушения конструктивных систем [8-17], показывает, что динамика структурного видоизменения системы зависит от целого ряда факторов (топология конструктивной системы, материал конструкции, вид напряженно – деформированного состояния, время и режим воздействия и др.). В настоящее время установлено [18-19], что напряженно-деформированное состояние бетона при динамических догружениях зависит не только от времени воздействия, но и от вида напряженного состояния и уровня микротрещинообразования в нем. Оценка этих и других параметров статико-динамического деформирования бетона, в том числе и выдвинутой авторами в развитие теории Г.А. Гениева и авторов гипотезы о том о том, что предельная деформация бетона зависит не только от вида напряженного состояния, но и от начального уровня напряженного состояния, с которого производится динамическое догружение [1], требует глубокой экспериментальной проверки. Расширение области физического эксперимента, в продолжение ранее проведенных экспериментальных исследований исследований [20-25], посвященных оценкам влияния динамических эффектов на двухкомпонентный материал типа железобетон в части экспериментального определения опытных характеристик режимного высокоскоростного однократного догружения бетона динамической нагрузкой после приложения статической нагрузки заданного уровня, представляется актуальной задачей [26-27].

В настоящей статье приводится авторская методика проведения экспериментальных исследований для определения параметров статико – динамического деформирования бетона, в частности, динамического модуля деформаций бетона, динамической прочности и прелельных деформаций при бетона при различных режимах его нагружения, приоритет которой защищен патентом РФ [28], а также некоторые результаты апробации этой методики выполненными экспериментальными исследованиями.

Методика исследования

Целью исследований явилось получение новых экспериментальных данных по определению параметров объемной деформации тяжелого бетона при одноосном кратковременном сжатии, а также определение опытных характеристик объемных деформаций, предельной деформативности динамической прочности бетона при его динамическом догружении. Согласно плана экспериментальных исследований объектом исследования являлись бетонные образцы призм, выполненные согласно требованиям ГОСТ 10180-2012. Предметом исследования являлись экспериментально полученные параметры диаграммы статико-динамического деформирования бетона при его динамическом догружении с заданного уровня статической нагрузки.

Методика испытаний образцов бетонных призм заключалась в следующем. До начала нагружения опытных образцов в них создается начальное усилие обжатия не более 2% от ожидаемой разрушающей нагрузки, принимаемое далее за условный нуль. Образец центри-

руется с выполнением условия максимального отклонения деформаций по каждой грани (образующей) 15% их среднего арифметического значения при нагружении от условного нуля до нагрузки, равной (40+5%) от разрушающей. Нагружение первого образца – близнеца осуществляется в два этапа. На первом этапе – низкоскоростное статическое нагружение производится под прессом непрерывно со скоростью $0,6 \pm 0,2$ Мпа/сек до заданного уровня нагрузки, не превышающего заданного в долях от разрушающей нагрузки. В связи с отсутствием стандартного оборудования, позволяющего проводить статическое испытание с динамическим высокоскоростным догружением образца на одной установке, фиксация требуемого уровня статического нагружения производилась с помощью специально разработанного устройства, описание и принцип работы которого подробно приведен в [28]. Затем опытный образец призмы догружается высокоскоростным нагружением (ударом) до его разрушения. Второй образец – близнец нагружается с той же скоростью что и первый на первом этапе нагружения до заданного уровня нагружения.

Описанная методика экспериментальных исследований опытных образцов – призм при статико – динамическом нагружении режиме нагружения реализуется с использованием испытательного оборудования лаборатории НИУ МГСУ. Для проведение экспериментальных исследований используется комбинация стандартного оборудования в виде гидравлического пресса MEGA 6-3000-100, (рисунок 1, а), универсальной динамической испытательной машины LabTest 6.500H.5.01.1 (рисунок 1, б) и специально разработанной установки для фиксации статической нагрузки. Данное испытательное оборудование оснащено системой автоматического управления и регистрации показаний. Максимальная испытательная нагрузка пресса составляет 3000кН, универсальной испытательной машины – 500 кН, максимальная частота регистрации данных – 5 кГц. Опытные значения продольных и поперечных деформаций бетонных образцов призм фиксируется с помощью тензорезисторов на полиэфирной подложке PLF-30. Измерительная база датчиков составляет 30 мм. Регистрация показаний тензорезисторов осуществляется при помощи комплекса оборудования NI PXIe-1082 (рисунок 1, в). Данное оборудование позволяет осуществлять регистрацию показаний с частотой дискретизации до 10 кГц.

Помимо датчика силы, встроенного в испытательную машину LabTest, использовался дублирующий датчик силы DYLF-102 (рисунок 1, г), синхронизированный при помощи комплекса NI PXIe-1082 с тензорезисторами, установленными на образцы. Для анализа структурных изменений в опытных образцах при статико-динамическом нагружении используется прибор ПУЛЬСАР 2.1 с датчиками сквозного прозвучивания. Регистрация изменения скорости прохождения ультразвука через образец при статическом нагружении позволяет определять влияние уровня микротрещинообразования на прочностные и деформационные характеристики при динамическом догружении.

Методика проведения испытаний включает следующие этапы:

- определения фактического класса прочности бетонных образцов по ГОСТ 10180-2012;
- производятся статические испытания бетонных призм для определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона бетона по методике согласно ГОСТ 24452-80;
- производится нагружение образцов статической нагрузкой до заданного уровня напряжений в конкретном образце (в описываемой методике было принято три уровня начальной статической нагрузки, соответствующей: $0,2 R_b$, $0,4 R_b$, $0,6 R_b$.), которая на заданном уровне фиксируется с помощью специальной установки зажимающей опытный образец между нижней и верхней пластинами, создавая тем самым создавая заданный уровень нагружения статической нагрузкой (рисунок 2);

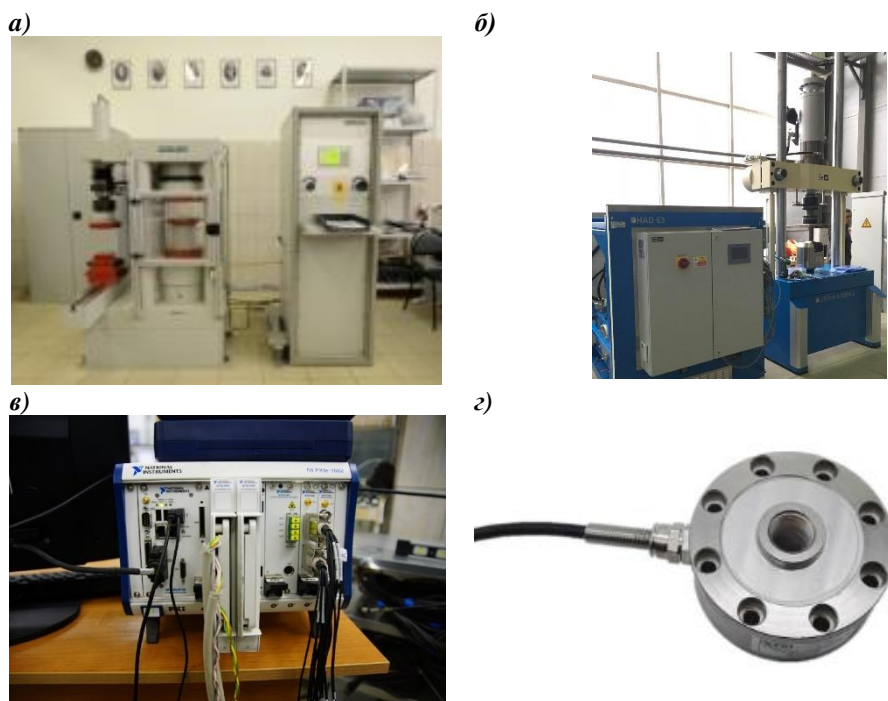
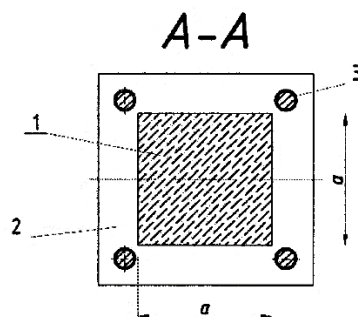
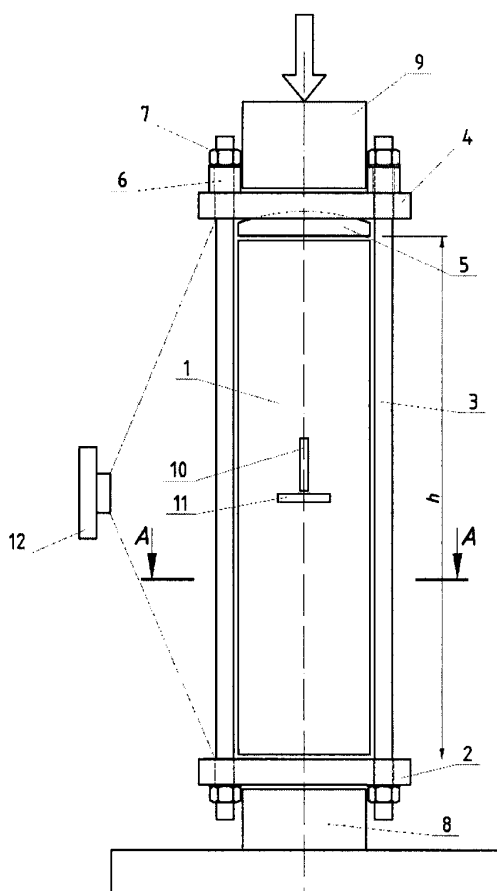


Рисунок 1 – Общий вид испытательного оборудования: а – пресс гидравлический MEGA 6-3000-100; б – универсальная динамическая испытательная машина LabTest 6.500H.5.01.1; в – комплекс оборудования NI PXIe-1082; г – датчик силы DYLFL-102



1 – образец; 2 – нижняя пластина; 3 – резьбовая шпилька; 4 – верхняя пластина; 5 – сферический шарнир; 6 – втулка; 7 – гайка; 8 – силоизмеритель; 9 – нагружающая траверса; 10 – продольный тензорезистор; 11 – поперечный тензорезистор; 12 – высокоскоростная камера

Рисунок 2 – Установка для экспериментального определения статико-динамических характеристик бетона

- для проведения динамического высокоскоростного догружения в комбинированную схему испытательной установки дополнительно вводится силоизмерительный датчик тензорезисторного типа, который синхронизирован по времени с показаниями тензорезисторов;
- производится высокоскоростное приложение нагрузки, которая позволяет реализовать в образце скорость приращения напряжений 500-800 МПа/с (рисунок 3).



Рисунок 3 – Общий вид высокоскоростного нагружения опытных образцов на оборудовании LabTest

Важной особенностью высокоскоростного нагружения является то, что в процессе испытаний испытаний образцов разных классов бетона, догружаемых с разных уровней статической нагрузки, обеспечивается возможность определения времени разрушения опытных образцов от начала соприкосновения ударника с поверхностью образца до его разрушения, увязывая его с динамической прочностью бетона. Тем самым появляется возможность прямого опытного определения одного из важнейших используемых в теории динамических параметров материала- модуля вязкости бетона [1]. При данных скоростях нагружения удается обеспечить разрушение опытных образцов в диапазоне времени $0,075 \pm 0,015$ с. Регистрация данных осуществляется с частотой 5 кГц.

Результаты и обсуждение

Апробация разработанной методики экспериментальных исследований проводилась на серии образцов бетонных призм размерами 10x10x40 см и кубов класса прочности В25. Первый этап испытаний включал нагружение испытываемой призмы статической нагрузкой до уровня $0,2 R_b$. Второй этап испытаний включал высокоскоростное догружение образца до разрушения динамической нагрузкой (однократным ударом) с уровня $0,2 R_b$. Для образцов бетонных призм этой же серии проводились статические и динамические испытания.

По результатам испытаний статической, динамической и статико-динамическим нагружением построены диаграммы «напряжения – объемная деформации» бетона при обозначенных режимах нагружения (рисунок 4), а также опытная зависимость изменения скорости ультразвука от напряженного состояния на этапе нагружения до первого параметрического уровня (рисунок 5).

Сопоставляя полученные графики можно видеть заметное влияние режима нагружения на объемные деформации бетона и их дилатационную составляющую, что подтверждает принятую в [1] гипотезу о наличии однопараметрической зависимости предельных деформаций бетона не только от вида напряженного состояния, но и от начального уровня напряженного состояния, с которого производится динамическое догружение.

В рамках рассматриваемых задач представляет интерес и график зависимости изменения скорости ультразвука от уровня напряженного состояния напряжения, построенный по опытным данным графоаналитическим методом. Параметрические уровни определялись по производным к аналитическим зависимостям исследуемых величин. Параметрическими яв-

ляются точки, которым соответствуют: перегиб на графике функции, излом – на графике первой производной и разрыв непрерывности первого рода на второй.

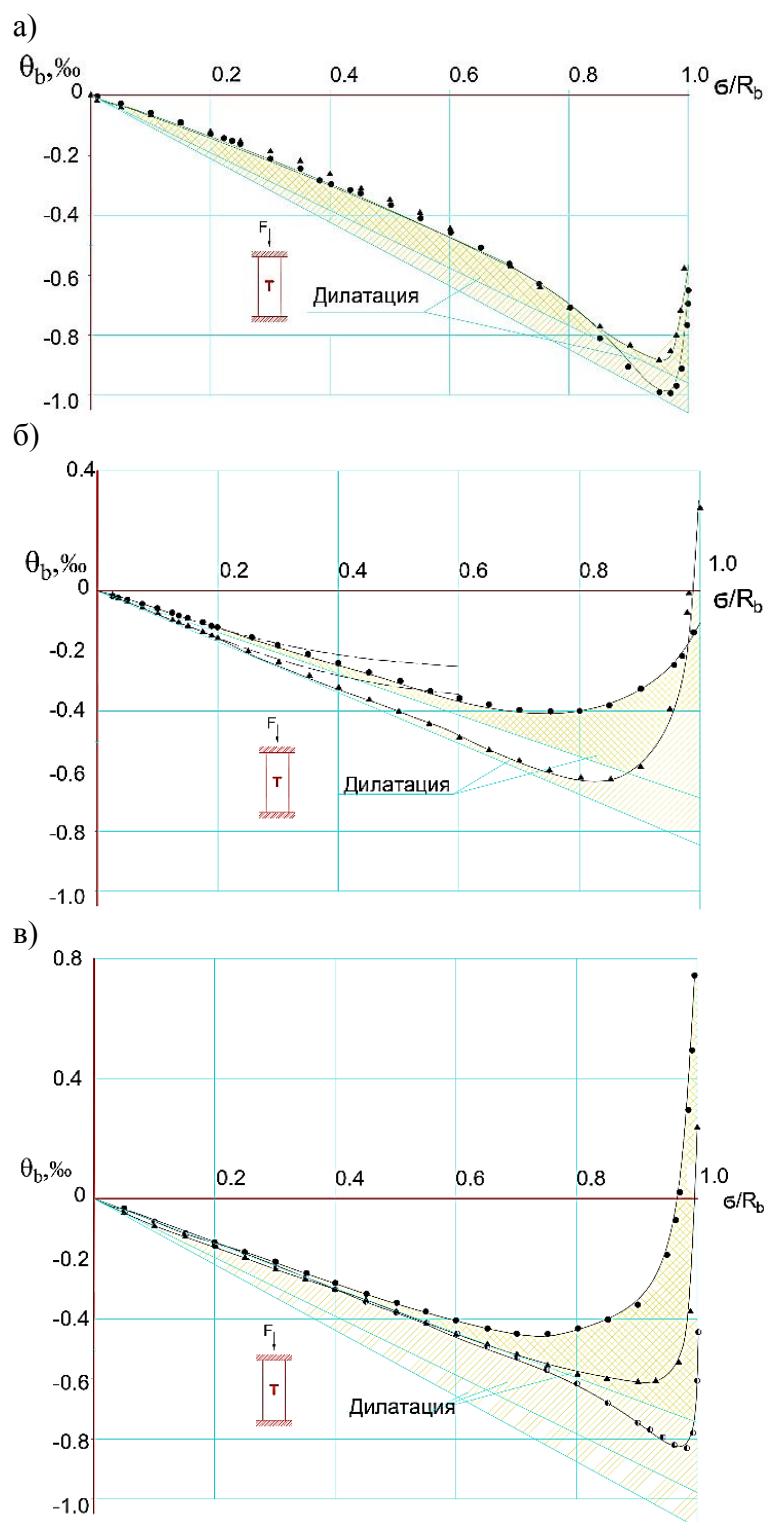


Рисунок 4 – Зависимость объемной деформации от напряжений в бетоне при разных режимах нагружения: а- статическом; б - статико-динамическом; в – динамическом

Полученные опытные параметры деформирования и прочности бетонных призм при рассматриваемых режимах нагружения приведены в таблице 1.

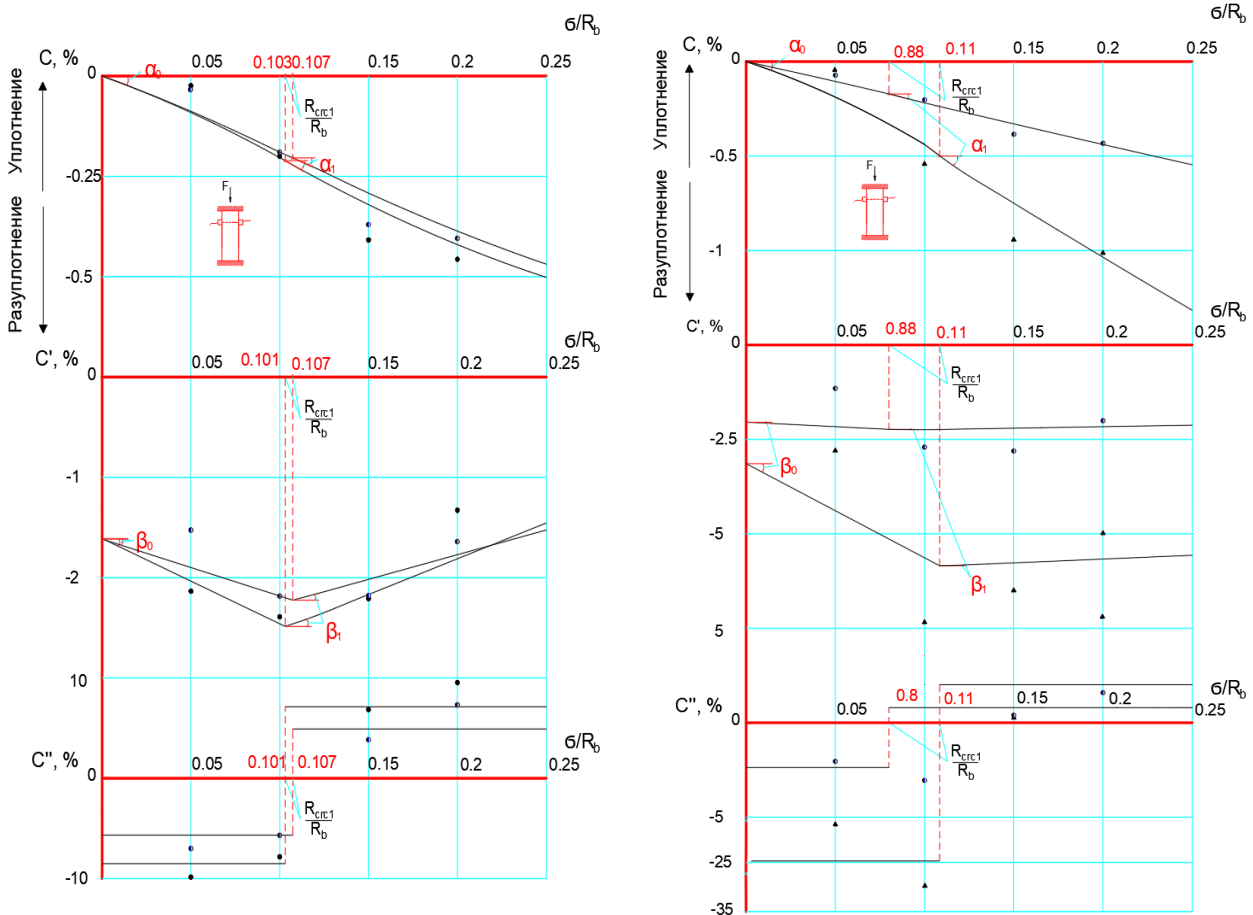


Рисунок 5 – Зависимости изменения скорости (С) прохождения ультразвуковых импульсов, а также ее первой (С') и второй (С'') производной от напряжений в бетоне опытного образца

Таблица 1 - Опытные параметры деформирования и прочности бетонных призм при разных режимах загрузки

Параметр	Статическое нагружение		Динамическое нагружение			Статико-динамическое нагружение	
	404-1С	404-2С	504-1ЧД	404-1ЧД	404-2ЧД	404-1Д20	404-2Д20
R_b , МПа	25,58	24,81	30,07	28,34	30,26	28,23	27,54
$\varepsilon_{ub} \cdot 10^{-3}$	2,60	2,61	2,47	2,47	2,51	2,49	2,48
t , сек	-		0,095	0,085	0,098	0,082	0,081

Анализ этих данных показывает, что предельная относительная деформация бетона при динамическом и статико-динамическом деформировании незначительно, порядка 4%, отличается друг от друга при заданном относительном нагружении статического нагружения опытных образцов до уровня 0,2 R_b . Более заметные различия относительных предельных деформаций (до 10%) наблюдаются в образцах при статическом и динамическом режимах нагружения. Из этого следует, что необходимо расширить диапазон варьирования опытных параметров и получить данные и для других уровней статической нагрузки при статико-динамическом нагружении опытных образцов.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить эффективность предложенной методики экспериментального определения параметров статико- динамического деформирования бетона для решения рассматриваемых задач его режимного нагружения. Анализ полученных результатов экспериментальных исследований первой серии образ-

цов призм с уровнем нагружения статической нагрузкой до условно первого параметрического уровня микротрещинообразования бетона $0,2R_b$ позволил получить диаграмму статико-динамического деформирования и определить требуемые параметры для оценки напряженно-деформированного состояния материала при рассматриваемом режиме нагружения. Уже на этом этапе принятая в [1] гипотеза о наличии однопараметрической зависимости предельных деформаций от уровня напряженного состояния, с которого производится динамическое догружение, в частности с первого параметрического уровня микротрещинообразования бетона $0,2R_b$ получила экспериментальное подтверждение.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90060.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федорова Н.В., Медянкин М.Д. Бушова О.Б. Определение параметров статико-динамического деформирования бетона// Промышленное и гражданское строительство. 2020. №1– С. 4-11.
2. Травуш В.И., Гордон В.А., Колчунов В.И., Леонтьев Е.В. Динамическое деформирование балки при внезапном структурном изменении упругого основания//Инженерно-строительный журнал. 2019. № 7 (91). С. 129-144.
3. Kolchunov V., Savin S., Androsova N. Cross section structure influence to deformation of construction at accidental impacts// MATEC Web of Conferences. 2018. С. 02029.
4. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. – М.: Стройиздат, 1974.–316 с.
5. Тамразян А.Г., Попов Д.С. Напряженно-деформированное состояние коррозионно-поврежденных железобетонных элементов при динамическом нагружении//Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 2. С. 19-26.
6. СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. М.: Минстрой России, 2018. 33с.
7. СП 296.1325800.2017 Здания и сооружения. Особые воздействия. Минстрой России. М., 2017. 23 с.
8. Колчунов В.И., Савин С.Ю. Критерии живучести железобетонной рамы при потере устойчивости// Инженерно-строительный журнал. 2018. № 4 (80). С. 73-80.
9. General services administration (GSA). Alternative path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance, revision 1, January 28, 2016
10. 53 UFC 2-023-03. Unified facilities criteria (UFC). Design of buildings to resist progressive collapse, 14 July 2009, change 3, 1 november 2016
11. Min Liu. A new dynamic increase factor for nonlinear static alternate path analysis of building frames against progressive collapse. Engineering Structures Volume 48. 2013. Pp. 666-673.
12. Livingston E., Sasani M., Bazan M., Sagirolglu S. Progressive collapse resistance of RC beams. Engineering Structures Volume 95. 2015, Pp. 61-70.
13. Masoero E., Daro P, Chiaia B.M. Progressive collapse of 2D framed structures: An analytical model. Engineering Structures Volume 54. 2013. Pp. 94-102.
14. Dat P.X., Hai T.K., Yu Jun. A simplified approach to assess progressive collapse resistance of reinforced concrete framed structures. Engineering Structures Volume 101. 2015., Pp. 45-57.
15. Травуш В.И., Федорова Н.В. Живучесть конструктивных систем сооружений при особых воздействиях // Инженерно-строительный журнал. 2018. №5. С. 73-80.
16. Brunesi E., Nascimbene R., Parisi F., Augenti N. Progressive collapse fragility of reinforced concrete framed structures through incremental dynamic analysis. Engineering Structures Volume 104. 2015. Pp. 65-79.
17. Кабанцев О.В., Тамразян А.Г. Учет изменений расчетной схемы при анализе работы конструкции //Инженерно-строительный журнал. 2014. № 5(49). С. 15-26. DOI: 10.5862/MCE.49.2.
18. Истомин А.Д., Беликов Н.А. Зависимость границ микротрещинообразования бетона от его прочности и вида напряжённого состояния//Вестник МГСУ. 2011. № 2-1. С. 159-162.
19. Зиновьев В.Н., Лизогуб А.А., Ляхова Н.Г., Ляхов Г.Г., Цыганкова А.М. Разрушение бетона// Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. 2019. № 1. С. 81-89.
20. Ahmadi R. Experimental and Numerical Evaluation of Progressive Collapse Behavior in Scaled RC Beam-Column Subassembly / R. Я_Ahmadi, O. Rashidian, R. Abbasnia, F. M. Nav, N. Usefi // Shock Vib. – 2016.
21. Pham A.T. Experimental study on dynamic responses of reinforced concrete frames under sudden column removal applying concentrated loading / A. T. Я_Pham, K. H. Tan // Eng. Struct. – 2017. – № 139 – 31–45с.
22. Yu J. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages / J. Я_Yu, K. H. Tan // Eng. Struct. – 2013. – № 55 – 90–106с.

23. Lew H.S., B. Yihai, S. Fahim, J. Main, S. Pujol, M.A. Sozen. An experimental and computational study of reinforced concrete assemblies under a column removal scenario. Boulder: Natl. Inst. Stand. Technol. Tech. Note 1720, 2011. – 104 p.
24. Fedorova, N. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions / N. Fedorova, Vu Ngoc Tuyen // IOP Journal of Physics: Conference Series (JPCS). Volume 1425, 1, 012033
25. Федорова, Н.В. Методика экспериментальных исследований деформирования монолитных железобетонных каркасов зданий при аварийных воздействиях/Федорова Н.В., Кореньков П.А., Ву Н.Т.//Строительство и реконструкция. 2018. № 4 (78). С. 42-52.
26. Кодыш Э.Н. Проектирование защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения с учетом возникновения особого предельного состояния // Промышленное и гражданское строительство. 2018 № 10 С. 95-101
27. Трекин, Н.Н. Защита многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения / Э.Н. Кодыш, Н.Н. Трекин, Д.А. Чесноков // Промышленное и гражданское строительство. – 2016 – №6. С.8-13.
28. Федорова Н.В., Медянкин М.Д. Способ экспериментального определения статико-динамических характеристик бетона Патент на изобретение №2696815. Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ) Заявка № 2019101336 Приоритет изобретения 17 января 2019 г. Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 06 августа 2019 г

REFERENCES

1. Fedorova N. V., Medyankin M. D. Bushova O. B. Opredelenie parametrov statiko-dinamicheskogo deformirovaniya betona [Determination of parameters of static and dynamic deformation of concrete]. *Industrial and Civil Construction*. 2020. No. 1. Pp. 4-11.(rus).
2. Travush V. I., Gordon V. A., Kolchunov V. I., Leontiev E. V. Dinamicheskoe deformirovanie balki pri vnezapnom strukturnom izmenenii uprugogo osnovaniya [Dynamic deformation of a beam in the event of a sudden structural change in the elastic base]. *Engineering and Construction Magazine*. 2019. No. 7 (91). Pp. 129-144. (rus).
3. Kolchunov V., Savin S., Androsova N. Cross section structure influence to deformation of construction at accidental impacts. *MATEC Web of Conferences*. 2018. p. 02029.
4. Geniev G. A., Kissyuk V. N., Tyupin G. A. Teoriya plastichnosti betona i zhelezobetona [Theory of plasticity of concrete and reinforced concrete]. *Moscow: Stroizdat*, 1974. 316 p. (rus).
5. Tamrazyan A. G., Popov D. S. Napryazhonno-deformirovannoe sostoyanie korroziyonno-povrezhdennykh zhelezobetonnykh elementov pri dinamicheskom nagruzhении [Stress-strain state of corrosion-damaged reinforced concrete elements under dynamic loading]. *Industrial and Civil Construction*. 2019. No. 2. Pp. 19-26.
6. SP 385.1325800.2018 Zashita zdaniy i sooruzheniy ot progressiruyushchego obrusheniya. Pravila proektirovaniya. Osnovnye polozheniya [Protection of buildings and structures from progressive collapse. The rules of design. Main provisions]. *M: Minstroy of Russia*. 2018. 33 p. (rus).
7. SP 296.1325800.2017 Zdaniya sooruzheniya. Osobyie vozdeystviya. [Buildings and structures. Special effects]. *M: Minstroy of Russia*. 2017. 23 p. (rus).
8. Kolchunov V. I., Savin S. Yu. Kriterii zhivuchesti zhelezobetonnoy ramy pri potere ustoychivosti [Criteria of survivability of reinforced concrete frame at loss of stability]. *Engineering and Construction Magazine*. 2018. No. 4 (80). Pp. 73-80.
9. General services administration (GSA). Alternative path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance. Revision 1. January 28, 2016.
10. 53 UFC 2-023-03. Unified facilities criteria (UFC). Design of buildings to resist progressive collapse. 14 July 2009, change 3, 1 November 2016
11. Min Liu. A new dynamic increase factor for nonlinear static alternate path analysis of building frames against progressive collapse. *Engineering Structures*. Vol. 48. 2013. Pp. 666-673.
12. Livingston E., Sasani M., Bazan M., Sagioglu S. Progressive collapse resistance of RC beams. *Engineering Structures*. Vol. 95. 2015. Pp. 61-70.
13. Masoero E., Daro P, Chiaia B.M. Progressive collapse of 2D framed structures: An analytical model. *Engineering Structures*. Vol. 54. 2013. Pp. 94-102.
14. Dat P.X., Hai T.K., Yu Jun. A simplified approach to assess progressive collapse resistance of reinforced concrete framed structures. *Engineering Structures* Vol. 101. 2015. Pp. 45-57.
15. Travush V. I., Fedorova N. V. Zhivuchest' konstruktivnykh system sooruzheniy pri osobykh vozdeystviyakh [Survivability of structural systems of structures under special influences]. *Engineering and Construction Magazine*. 2018. No. 5. Pp. 73-80. (rus).
16. Brunesi E., Nascimbene R., Parisi F., Augenti N. Progressive collapse fragility of reinforced concrete framed structures through incremental dynamic analysis. *Engineering Structures*. Vol. 104. 2015. Pp. 65-79.
17. Kabantsev O. V., Tamrazyan A. G. Uchet izmeneniy raschetnoy skhemy pri analize raboty konstruksii [Accounting for changes in the design scheme when analyzing the design work]. *Engineering and Construction Magazine*. 2014. No. 5(49). Pp. 15-26. DOI: 10.5862/MCE. 49. 2. (rus).
18. Istomin A. D., Belikov H. A. Zavisimost' granits microtreshchinoobrazovaniya betona ot ego prochnosti i vida napryazhonnoy sostoyaniya [Dependence of the boundaries of microcracking of concrete on its strength and type of stress state]. *MSU Bulletin*. 2011. No 2-1. Pp. 159-162. (rus).

19. Zinoviev V. N., Lizogub A. A., Lyakhova N. G., Lyakhov G. G., Tsygankova A.M. Razzrushenie betona [Destruction of concrete]. *Bulletin of the Kant Baltic Federal University. Series: Physical, mathematical and technical Sciences*. 2019. No. 1. Pp. 81-89. (rus).
20. Ahmadi R. Experimental and Numerical Evaluation of Progressive Collapse Behavior in Scaled RC Beam-Column Subassembly / R. Я_Ahmadi, O. Rashidian, R. Abbasnia, F. M. Nav, N. Usefi. *Shock Vib*. 2016.
21. Pham A.T. Experimental study on dynamic responses of reinforced concrete frames under sudden column removal applying concentrated loading / A. T. Я_Pham, K. H. Tan // *Eng. Struct.* 2017. No 139. Pp. 31–45.
22. Yu J. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages / J. Я_Yu, K. H. Tan // *Eng. Struct.* 2013. No 55. Pp. 90–106.
23. Lew H.S., B. Yihai, S. Fahim, J. Main, S. Pujol, M.A. Sozen. An experimental and computational study of reinforced concrete assemblies under a column removal scenario. *Boulder: Natl. Inst. Stand. Technol. Tech. Note 1720*. 2011. 104 p.
24. Fedorova, N. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions / N. Fedorova, Vu Ngoc Tuyen // *IOP Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*. Vol. 1425. 1. 012033
25. Fedorova N. V. Metodika eksperimental'nyh issledovaniy deforirovaniya monolitnyh zhelezobetonnyh karkasov zhdaniy pri avariynyh vozdeystviyah [Method of experimental research of deformation of monolithic reinforced concrete frames of buildings under emergency impacts] / Fedorova, N. V., Korenkov, P. A., vu, N. T. / *Construction and Reconstruction*. 2018. No. 4 (78). Pp. 42-52.(rus).
26. Kodysh E. N. Proektirovanie zashchity zdaniy i sooruzheniy ot progressiruyushchego obrusheniya s uchotom voznikshogo osobogo predel'nogo sostoyaniya [Design of protection of buildings and structures from progressive collapse taking into account the occurrence of a special limit state]. *Industrial and Civil Construction*. 2018 No 10 Pp. 95-101. (rus).
27. Trekin, N. N. Zashita mnogoetazhyh zdaniy ot progressiruyushchego obrusheniya [Protection of multi-storey buildings from progressive collapse] / E. N. Kodysh, N. N. Trekin, D. A. Chesnokov /. *Industrial and Civil Construction*. 2016. No. 6. Pp 8-13. (rus).
28. Fedorova N. V., Medyankin M. D. Sposob eksperimental'nogo opredeleniya statiko-dinamicheskikh harakteristik betona [Method for experimental determination of static-dynamic characteristics of concrete]. Patent for invention No. 2696815. *Patent holder: Federal state budgetary educational institution of higher education "national research Moscow state University of civil engineering" (NRU MGSU) Application No. 2019101336 Priority of the invention January 17. 2019. Date of state registration in the State register of inventions of the Russian Federation 06 August 2019. (rus).*

Информация об авторах

Федорова Наталия Витальевна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия, доктор технических наук, профессор, директор филиала НИУ МГСУ в г. Мытищи
E-mail: FedorovaNV@mgsu.ru

Медянкин Михаил Дмитриевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия, аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций
E-mail: 412125453@mail.ru

Бушова Олеся Борисовна

ООО «ПИК-Проект» г. Москва, Россия, конструктор-проектировщик
E-mail: bushova96@mail.ru

Information about authors

Fedorova Natalia Vitalyevna

Federal State Budgetary Educational Institution of the Higher Education "National research Moscow state construction university" (NIU MGSU), Moscow, Russia, Doctor of Engineering, professor, director of the branch of NIU MGSU in Mytishchi
E-mail: FedorovaNV@mgsu.ru

Medyankin Mihail Dmitrievich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State Construction University" (NIU MGSU), Moscow, Russia, postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures
E-mail: 412125453@mail.ru

Bushova Olesya Borisovna

PIK-Proekt LLC, Moscow, Russia, engineer
E-mail: bushova96@mail.ru

Е.В. ХОЛОДОВА¹

¹Научно-исследовательской институт теории и истории архитектуры и градостроительства (НИИТИАГ) Филиала ФГБУ "ЦНИИП Минстроя России", г. Москва, Россия

«ЗОЛОТОГО ВЕКА» В АРХИТЕКТУРЕ УСАДЕБНЫХ ЗДАНИЙ КУРСКОЙ ГУБЕРНИИ 1-я ПОЛОВИНА XVIII - 2-я ПОЛОВИНА XIX ВВ.

Аннотация. Исследование основано на выявленных архивных и печатных источниках, натуральных исследованиях автора, которые позволяют более обоснованно реконструировать архитектуру утраченных и сохранившихся фрагментов дворянских и купеческих усадеб на территории порубежного региона России в период «Золотого века» русской усадьбы.

Научная новизна исследования связана с проведением авторских экспедиций по выявлению признаков существования и натурном обследовании ряда сохранившихся усадебных комплексов, не привлекавшие ранее в должной мере внимание исследователей. Особую значимость имеет выявление архивных и печатных источников, которые позволяют более обоснованно реконструировать образную и материальную структуру утраченных элементов дворянских и купеческих усадеб.

Особая значимость выполненной комплексной исследовательской работы обусловлена возможностью заполнить лакуны в изучении важных страниц истории общенациональной и региональной русской культуры, отразившихся на формировании региональных особенностей строительных приёмов и образности архитектурных ансамблей усадеб Курского края.

Ключевые слова: курский край (губерния), архитектура, стилизация, композиция, планировка, господские дома, церкви, строительство, реконструкция.

E.V. KHOLODOVA¹

¹Institute of theory and history of architecture and urban planning (NIITAG) branch of "CSRIP of the Ministry of construction of Russia", Moscow, Russia

"GOLDEN AGE" IN THE ARCHITECTURE OF MANOR BUILDINGS KURSK PROVINCE 1st HALF of the XVIII - 2nd HALF of the XIX CENTURY

Abstracts. The research is based on identified archival and printed sources, as well as on-site research by the author, which allows us to reconstruct the architecture of lost and preserved fragments of noble and merchant estates in the territory of the Russian border region during the "Golden age" of the Russian estate.

The scientific novelty of the research is associated with the author's expeditions to identify signs of existence and field survey of a number of preserved manor complexes that did not previously attract the attention of researchers. Of particular importance is the identification of archival and printed sources that allow us to reconstruct more reasonably the figurative and material structure of the lost elements of noble and merchant estates.

The special significance of the completed complex research work is due to the possibility to fill in the gaps in the study of important pages of the history of national and regional Russian culture, which were reflected in the formation of regional features of construction techniques and imagery of architectural ensembles of estates in the Kursk region.

Keywords: Kursk region (province), architecture, stylization, composition, layout, manor houses, churches, construction, reconstruction.

Введение

Предметом исследования является загородное усадебное строительство Курского края, рассмотренное в рамках значительного в историко-культурном отношении хронологическом периоде – 2-й половины XVIII – 1-й половины XIX вв., называемом «Золотым веком» усадебной культуры.

Объекты исследования – поместья, имения, усадьбы и дачи привилегированных сословий Курского края: дворянства и купечества в части рассмотрения усадебных зданий.

Поскольку административные границы послереволюционного периода развития страны менялись, при определении территориальных границ исследования принят термин «Курский край», как рабочий инструмент, позволяющий рассматривать существовавшую на протяжении XVIII – 1-й половины XIX веков как территориальную целостность, определявшую формирование в её пределах специфических черт культуры.

К историографии проблемы исследования на территории Курского края отметим следующее. Исторические сведения об усадьбах Курского края редко встречаются на страницах дореволюционных изданий. Нет отдельных статей и монографических работ комплексных исследований, посвящённых теме строительства и архитектуре Курского края.

Исследователи конца XIX – начала XX вв., оставаясь в рамках исторической фактологии, к сожалению, не развили в своих трудах художественного осознания усадебной архитектуры.

В местной периодической печати (в Курских губернских и Епархиальных ведомостях и др.) упоминания об усадьбах встречаются лишь в фактических сообщениях.

Значительным явлением в курской летописной истории стал выход ряда изданий А.А. Танкова, Д.И. Багалея.

В течение XX века усадьбы Курского края не привлекали должного внимания архитекторов и искусствоведов. Наиболее удачливой оказалась усадьба Барятинских "Марьино", которой посвятили свои работы архитектор С.И. Фёдоров, историк Е.В. Кончин, искусствоведы М.С. Тарасова, Н.А. Синянская.

Описание памятников архитектуры отдельных белгородских усадеб встречаются в очерках архитектора Л.И. Колесниковой.

Исторические сведения из жизни отдельных усадеб Курской губернии и их владельцев прозвучали в публикациях курских исследователей и краеведов (1990-е - 2000-е гг.).

Большой вклад в изучение эволюции строительства сельского жилища русско-украинского пограничья внесли труды Л.Н. Чижиковой.

Дворянские имения в процессе крепостничества Центрального Черноземья 1-й половины XVIII в. (эволюция поместно-вотчинного фонда, статистика и структура дворянских поместий) представлены в работах историка С.В. Черникова. Эволюция дворянских и купеческих землевладений Центрального Черноземья в пореформенный период рассмотрены в трудах историков В.А. Шаповалова, В.С. Кулабухова, Г.И. Старченко, В.В. Бычковского, И.Т. Шатохина и др.

Обзор литературы и научных работ, дающий представление о степени достаточно полного освещения проблемы, подтверждает, что Курские усадьбы не были ещё предметом целостного историко-архитектурного исследования периода XVII - начала XX вв. Зарубежные исследования так же отсутствуют.

Актуальность исследования обусловлена тем, что русская усадьба сегодня является реликтовой исчезающей темой. Сегодня бывшие дворянские и купеческие загородные усадьбы Курского края самая незащищённая часть объектов культурного наследия - бесхозные, разбираемые на стройматериалы, калечащиеся некомпетентными ремонтами. К началу XX в. в Курской губернии было более 6 000 усадеб. На территории современных регионов, входящих в бывшую Курскую губернию, можно назвать лишь около ста мест, где фрагменты усадебных комплексов, различимы по остаткам аллей парков, прудов и усадебных строений. Усадебных комплексов, поддерживаемых регулярной реставрацией единицы. В результате хозяйственной деятельности исчезают семейные некрополи и уникальные усадебные ландшафты.

С курскими усадьбами связаны жизнь и деятельность многих известных исторических личностей, общественных и политических деятелей и деятелей науки и искусства. Курская усадьба стала колыбелью становления отечественной науки, искусства и культуры.

Основная цель работы – исследование основных стилистические этапы и объёмно-планировочные решения в архитектуре усадебных зданий, в контексте общих художественных процессов «Золотого века» 2-й половины XVIII - 1-й пол. XIX вв. на одной из значительных территорий чернозёмных областей южного побережья России – Курского края.

Основная часть

Эпоха «Золотого века» русской усадьбы по историческим меркам невероятно коротка: она началась в 1762 году после опубликования манифеста Петра III «О вольности дворянства» и завершилась после издания другого манифеста – «Об освобождении крестьян» – Александром II в 1861 году.

Сохранившиеся на территории Курского края усадьбы и документы, показывают, что их большинство относятся к эпохе классицизма 1780 – 1830-е гг.

Ярким пример здесь служит усадебный дом Верёвкиных в Пристенном (см. рисунок 1). Двух- трёхэтажный симметричный в строгих формах особняк (1780-х гг.), с четырёхколонным портиком, где главное здание соединено одноэтажными переходами с флигелями, расположенными симметрично по сторонам, образуя парадный курдонер.

Подобны ему множество барских домов кирпичных и деревянных, в Яковлевке Трутовских, Жеребцово Анненковых (см. рисунок 2), Берёзе Волжиных и многих др.

а)



б)



Рисунок 1 – Усадебный дом последней четверти XVIII в. в Пристенном Верёвкиных. Фото Е. Холодовой, 2000 г.: а) вид со стороны курдонера, б) вид со стороны парка

а)



б)



Рисунок 2 – Усадебный дом последней четверти XVIII в. в Жеребцово Анненковых. Фото 1960-х г. г. из фондов Историко-краеведческого музея Полянской средней общеобразовательной школы Курского р-на: а) вид западного фасада, б) вид с юга

Выдающимся памятником эпохи классицизма является и дворец Барятинских в знаменитой курской усадьбе Марьино.

Центром композиции ансамбля является трехэтажное здание дворца с боковыми одноэтажными флигелями, образующими по обеим сторонам парадного двора, несколько суживающегося к въездным воротам, два хозяйственных двора, соединенных с ним проездными арками.

Дворец был построен в соответствии с проектом (1811-1812 гг.) курского архитектора Карла Ивановича Гофмана к 1820 г. (см. рисунки 3-4).

Первоначально дворец назывался Избицким домом, так как он строился на берегу реки Избицы, но позднее его стали называть Марьиным, как и всю усадьбу, по имени первой и второй жен И.И. Бяратинского.

Сохранившиеся чертежи главного и паркового фасадов архитектора К.И. Гофмана (см. рисунок 3) и картина неизвестного художника «Дворец в Марьине» 1815-1816 годов доносят первоначальный облик дворца.

Симметричность главного северного фасада дворца подчеркнута выступающим в курдонер центральной частью, с куполом и четырехколонным портиком полного ионического ордера. Под этим портиком на уровне второго этажа имеется широкая терраса, по боковым сторонам которой устроены угловые балконы.

Боковые части главного фасада имеют пилястры ионического ордера, между которыми устроены декоративные ниши. К одноэтажным крыльям дворца, образующим парадный и хозяйственные дворы, примыкают двухэтажные здания служебного назначения (см. рисунок 4).

а)



б)



*Рисунок 3 – Проект дворца в усадьбе «Марьино» Бяратинских, архитектор Карл Гофман, 1810-е гг. Фонды Музея архитектуры имени Щусева (МУАР):
а) северный фасад, б) южный фасад*

Центральная часть южного паркового фасада дворца имела три большие арки, украшенные колоннами ионического ордера, а боковые части - по пять крупных полуциркульных окон, разделенных пилястрами. С угловых полуциркульных балконов центральной части паркового фасада к открытой террасе вели каменные лестницы. Широкая гранитная лестница спускалась с открытой террасы в парк [1].

Общая композиция дворца и отдельные его детали позволяют отнести здание к позднему классицизму.

Классицизм представлен и особенно развит был в церковном зодчестве. Например, в храмах имения Бяратинских - Большие Угоны, Ивановское, Густомой, а так же Капыстичи Воропановых, Карманово, Анненковых и многих др.

Ярким представителем позднего классицизма является храм в с. Глушково (см. рисунок 5). В 1791 г. Матвеевы продают знаменитую петровских времён суконную фабрику и Глуш-

ковское имение генерал-аншефу, писателю и музыканту, скульптору и архитектору графу П.С. Потёмкину. При нём случились новые преобразования в промышленном комплексе и строительстве зданий усадьбы и планировке парка. К 1822 г. по его проекту была значительно расширена и реконструирована Троицкая церковь [2]. Перед западным входом церкви была возведена отдельно стоящая пятиярусная колокольня с примыкающими к ней двухэтажными флигелями. Территория храма была обнесена кованой, на кирпичных столбах, оградой. Архитектура ансамбля Троицкой церкви, отличалась формами, исполненными в стиле ампир. Прямоугольный трёхнефный храм завершали внушительный на высоком барабане купол и четыре малые главки. Западный вход акцентирован шестиколонным портиком ионического ордера и поясом аллегорических барельефов по сторонам парадного входа. Фасады отличались богатством лепного декора: гирлянды, медальоны, пилястры, пояски, полуколонки, замковые серафимы, карнизный пояс херувимов и др. Интерьеры так же впечатляли изящной лепниной и живописью аллегорического характера. Особо парадный вид представляла трапезная с восемью ангелами-кариатидами, поддерживающими богатый значительного выноса карниз коробового лепного свода (см. рисунок 5). Создатель великолепного памятника С.П. Потёмкин был похоронен у северной стены храма. [3].

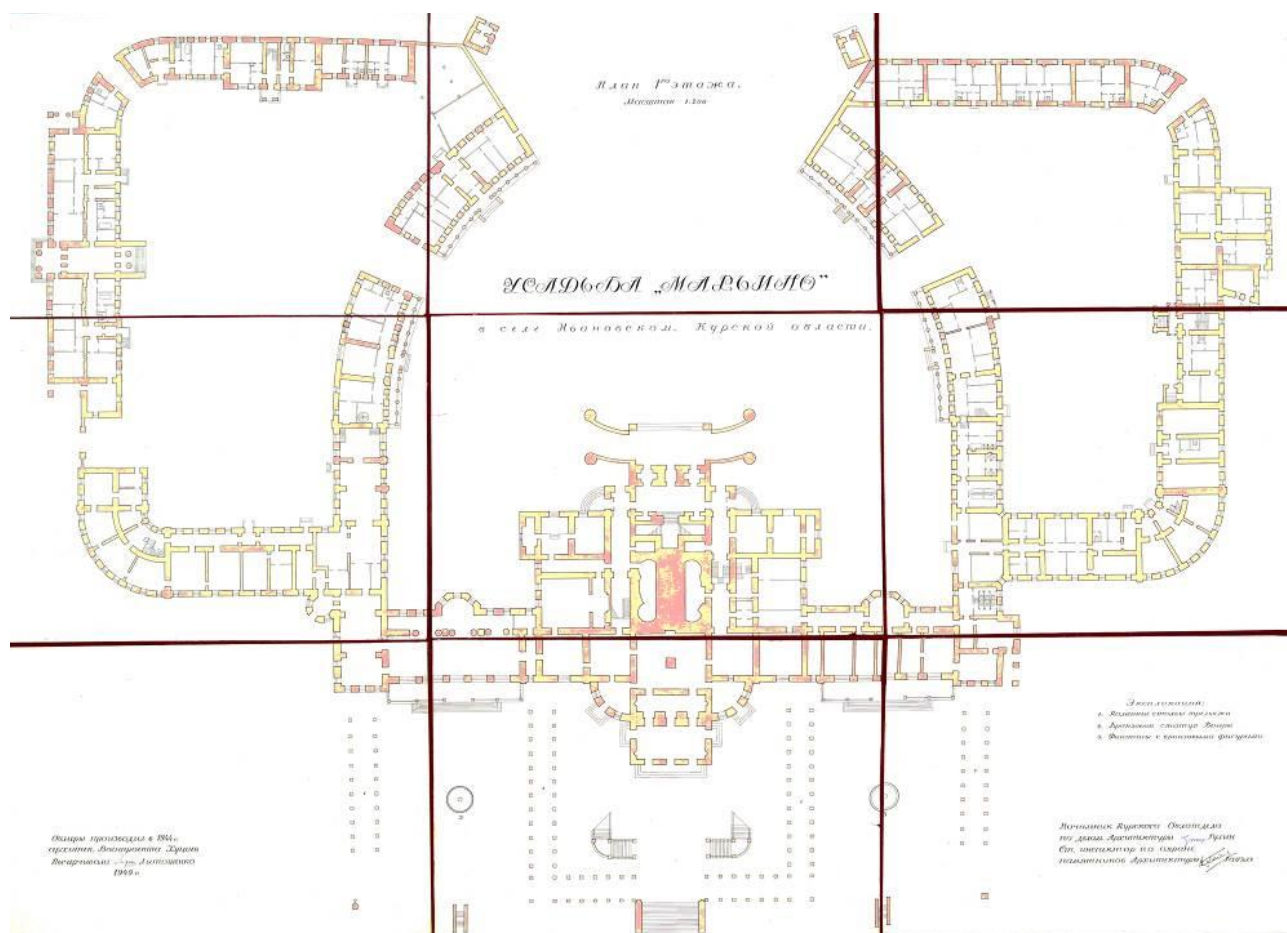


Рисунок 4 – Обмерный план дворца усадьбы «Марьино» Бяратинских. Фонды Музея архитектуры имени Щусева (МУАР). Шифр хранения Р V-4152-3

Памятником эпохи классицизма являлась усадьба Хорватов конца XVIII - первой четверти XIX веков. Сегодня о барской усадьбе напоминают лишь три сохранившиеся усадебные службы, фрагмент ограды и полторовековой регулярный парк. Напротив усадьбы на старинной дороге Белгород-Ахтырка возвышается оригинальное сооружение цилиндрического объёмно-планировочного решения, которое местные жители называют Круглое здание (см. рисунок 6).

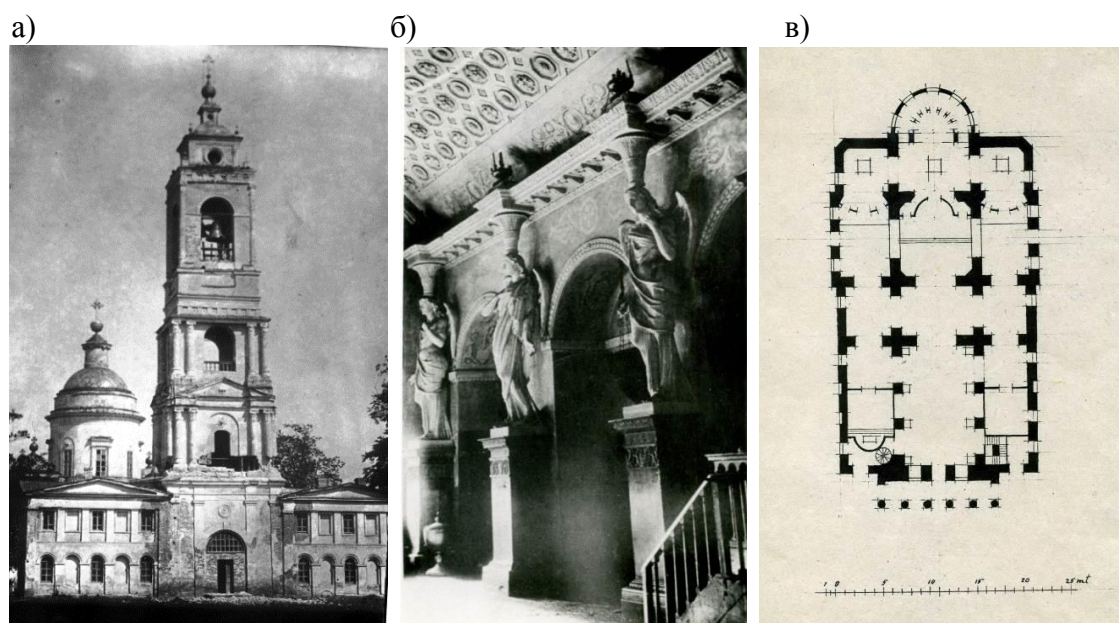


Рисунок 5 – Церковь Святой Троицы в с. Глушково. Реконструкция по проекту архитектора С.П. Потёмкина в 1822 г. Фото и обмерный план выполнил архитектор-художник Г.К. Ткаченко в 1933 г. Документы из личного архива Г.А. Ткаченко:

а) вид на колокольню и храм с запада, б) интерьер северной части трапеznой, в) обмерный план

Декоративное убранство фасадов Круглого здания выдержано в формах строго классицизма. Декор строится на чередовании различной формы ниш и проёмов. Всё в архитектуре этого здания довольно просто, лаконично и между тем тщательно продумано.

В плане здание круглое, имеет три надземных и один цокольный этаж. Его композиция представляет собой "цилиндр в цилиндре". Довольно внушительный наружный цилиндр диаметром около 27 м поднят на высоту двух этажей. Внутренний цилиндрический объём диаметром 10 м, расположен строго по центру наружного цилиндра и возвышается над ним в виде барабана, завершённого куполом. Основные входы здания ориентированы строго по сторонам света.

Во внутренних стенах малого цилиндра устроено двенадцать полукруглых в плане ниш, расположенных по три напротив друг друга, с восточной и западной сторон, на втором и третьем этаже объекта. Цокольный уровень не связан с остальными этажами здания. Здесь два наружных входа – с юго-западной и юго-восточной сторон. Его планировка в основном повторяет членение верхних двух этажей. Помещения здесь перекрыты кирпичными коробовыми сводами.

Вопрос о назначении Круглого здания до сих пор остаётся открытым. [4, с.16-21]

Можно сказать, что в планировке "круг с центром", заложена древняя солярная символика, что имеет трактовку Храма Солнца, и посвящено одному из главных символов масонства. Есть предположения строительство Круглого здания, как масонского храма. В целом Круглое здание является ярким примером классицистического усадебного здания рубежа XVIII-XIX вв. [4, с.31-35]

Период романтизма (сер. 1820-х – 1860-е гг.) отмечен переходом от сельской дворянской усадьбы к купеческой, усадьбам лиц свободных профессий, интеллигенции.

Усадьбы характеризуются такими терминами, как разнообразие, пластичность форм, многостилье, и в целом неоклассичность стилевой ориентации. Усадебный дом, малые архитектурные формы, хозяйственные постройки получают сложную многообъёмную живописную композицию.

Здесь, например, прослеживается излюбленная для загородного строительства тема неоготики, которая проходит на протяжении всей первой половины XIX в., как в архитектуре

главных усадебных домов, например, в Мокве Нелидовых, Нескучном Лансере, Ракитном Юсуповых, так и в храмах, например, кирха в Марьино, парковая беседка в Нижних деревеньках и др.

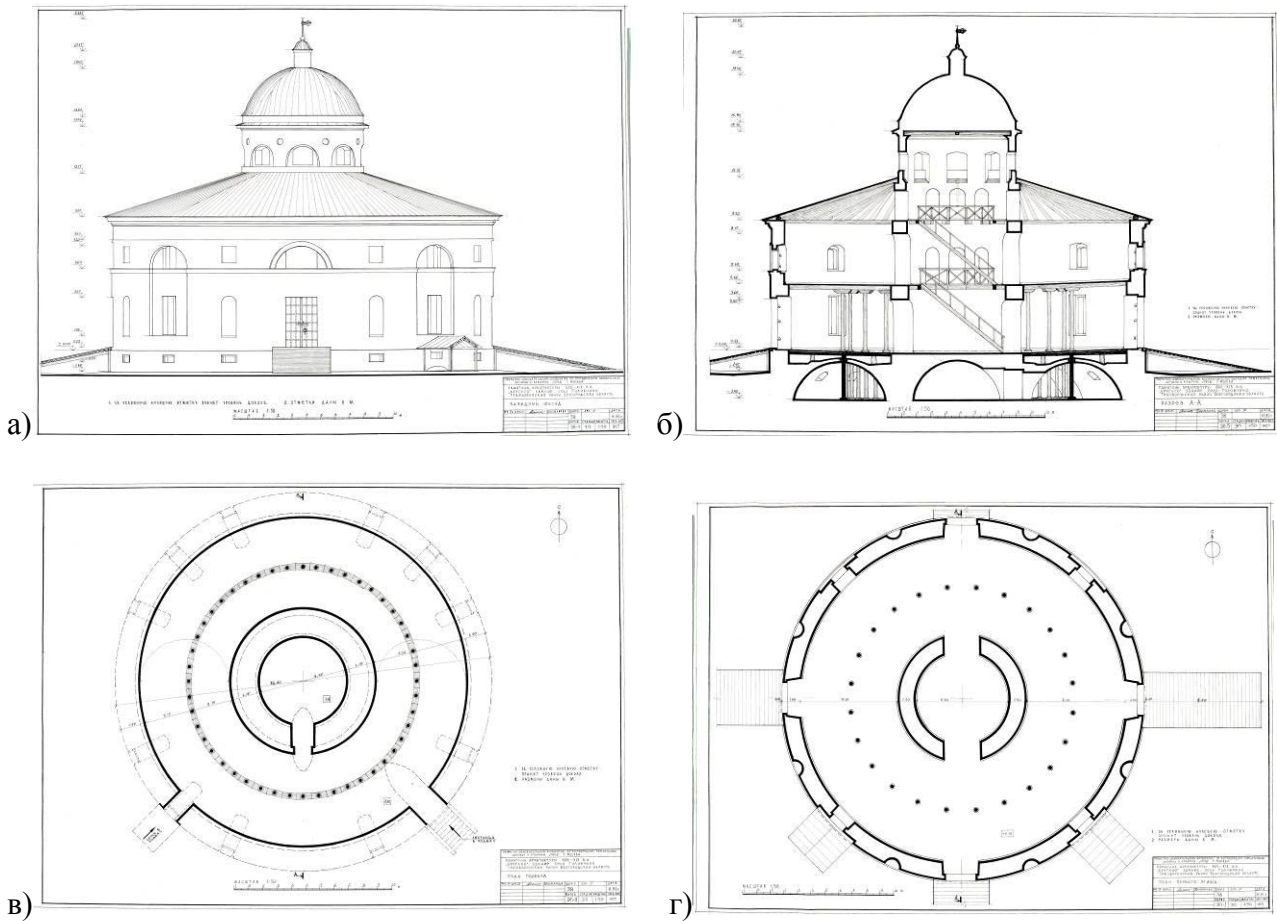


Рисунок 6 – *Круглое здание в усадьбе Хорватов Головчино. Обмерные чертежи Проектно-изыскательского кооператива «Свод», г. Москва, 1991 г. Музей архитектуры имени Щусева (МУАР). Шифр хранения Р V-8710: а) западный фасад, б) разрез, в) план цокольного этажа, г) план 1-го этажа*

Так, в Мокве Нелидовых сложный силуэт дворца, свободное планировочное решение, богатство форм - стрельчатые окна, цветные витражи, башни, зубцы, бойницы - явились ярким отражением неоготического направления периода романтизма. Дворец, сливаясь с окружающим ландшафтом, создавал неповторимый и загадочный мир "рыцарского замка" (см. рисунок 7).

Кирпичный одно-трехэтажный дворец с системой разновеликих объемов вмещал более сорока помещений различного назначения. В уровне первого этажа, центральной части дворца, располагались приемные покои. Их интерьеры отличались от остальных большей высотой, обилием декоративных украшений, здесь было представлено художественное собрание усадьбы - картины, скульптура и другие ценности. Верхние этажи занимали библиотека, кабинеты и многочисленные жилые комнаты. В цокольном уровне располагались: жильё для прислуги, хозяйственные кладовые, кухня, а также топочные, откуда по дымоходам в стенах тепло распространялось в каминные и голландские печи, согревая весь дом в холодную долгую зиму [5].

Середина XIX в. в архитектуре показывает переход от классицизма к эклектике, ко многим формам предыдущих исторических стилей.

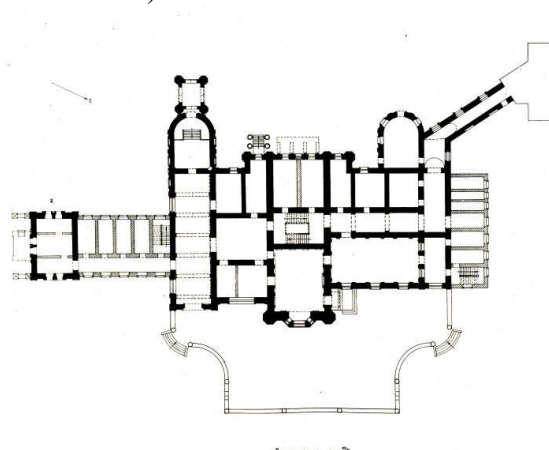
Например, в Марьино Бярятинских ампириное здание первой четверти XIX в. было кардинально реконструировано в 1869-1873 гг. по проекту известного петербургского зодчего И.А. Монигетти (1819-1878). Перестройку производил архитектор К.Г. Шольц [6, с.45]. Про-

ект реконструкции был выполнен под влиянием новых художественных вкусов второй половины XIX в. – их эволюцию в сторону обогащения архитектуры декоративными формами, заимствованными в искусстве позднего Возрождения (см. рисунок 8).

а)



б)



в)

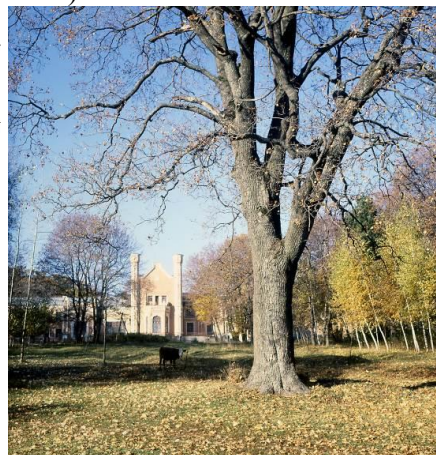


Рисунок 7 – Дворец и парк в усадьбе «Моква» Нелидовых. Фото Е. Холодовой, 1997 г.

План дворца, обмеры М.Федотовой, 1976 г.:

а) дворец вид со стороны парка с запада, б) план 1-го этажа дворца,

в) вид восточного партера и дворца со стороны пруда.

После перестройки композиция здания приобрела большую цельность. Прежде всего, классицистический дворец изменил силуэт – световой барабан над круглым залом и венчающий его купол были разобраны и заменены пирамидальным фонарём. Стены центральной части главного корпуса надстроили, таким образом увеличилась высота третьего этажа и образовались невысокие четвертый и пятый.

Сильно развитый венчающий карниз был поднят, над ним устроили высокий парапет и балюстраду. В боковых крыльях центральной части заложили оконные проёмы – в третьем этаже и в первом. Изменилось обрамление окон второго этажа, исчезли скульптуры, находившиеся прежде в нишах.

Огромные световые проёмы центральной части паркового фасада были заложены. Вместо арок и колонн в плоскости стены появились обычные окна и балконные двери, между которыми разместились пилястры. Сооружена сложной конфигурации лестница, ведущая к террасе второго этажа паркового фасада. Была произведена небольшая внутренняя перепланировка помещений.

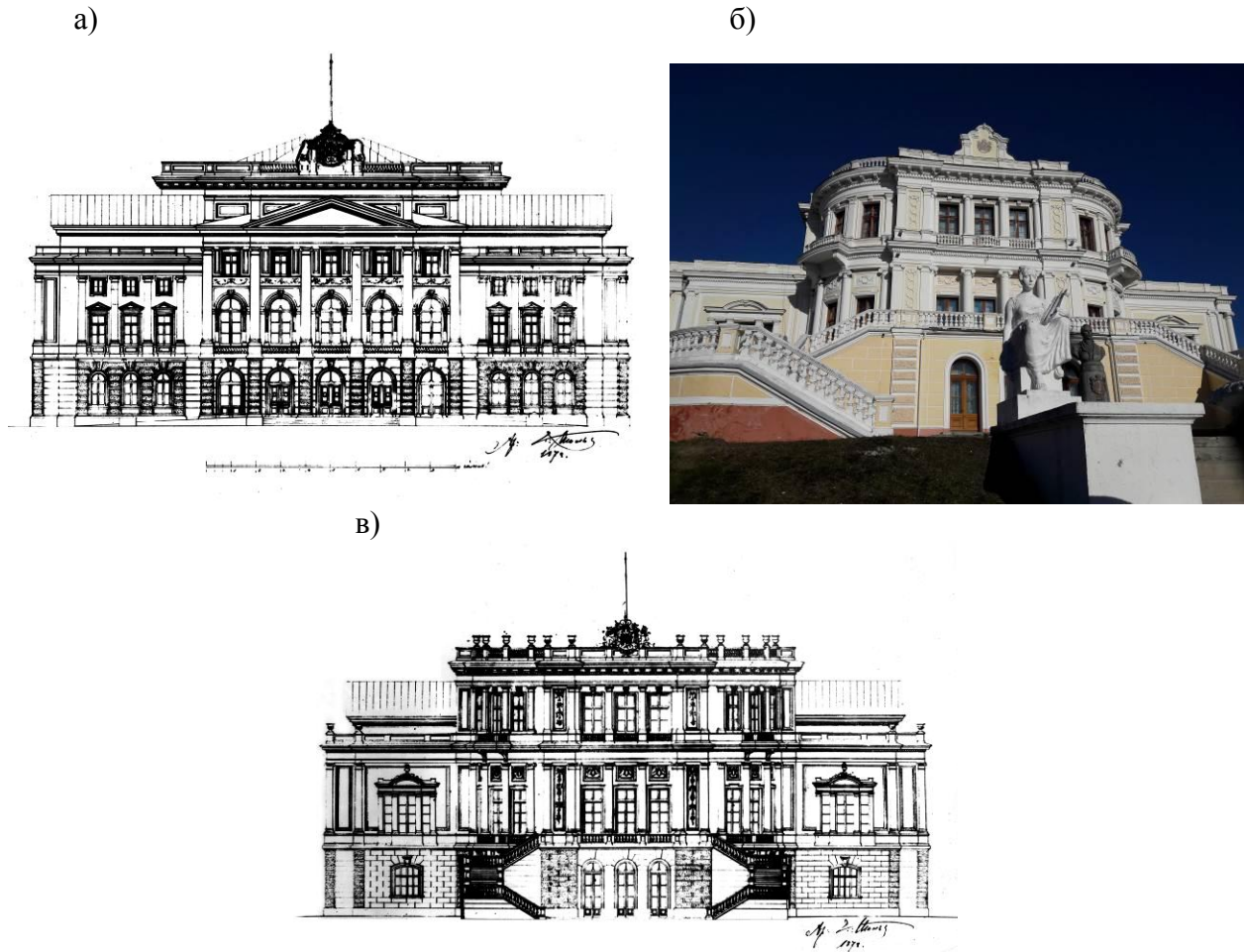


Рисунок 8 – Дворец в усадьбе «Марьино» Бярятинских. Проект реконструкции дворца архитектор И. Монигетти, производитель работ К. Шольц. Чертежи 1878 г. Музей архитектуры имени Щусева (МАУА). Фото Е. Холодовой, 2020 г.: а) чертеж северного фасада, б) фото южного фасада, в) чертеж южного фасада

Выдающимся памятником усадебного строительства этого периода является дворец Клейнмихелей в Ивне, сооружённый в 1860-х гг. (разрушен в 1920-х гг.) [7]. Судить о прошлом великолепия и размахе дворца можно по воспоминаниям современников и дореволюционным фотографиям, показывающим центральную часть грандиозного здания [7]. Этот величественный дворец повторял монументальные формы европейского барокко. По своему объёмно-композиционному решению и декоративному убранству усадебный дом походил на крупные городские и загородные резиденции именитых столичных вельмож середины XVIII века (дворцы В. Растрелли в Анненгофе, Рундале, Аничков дворец в Петербурге и др.). Здание имело симметричную композицию, состоящую из трёх двухэтажных объёмов-ризалитов с сильным центром – возвышающейся главной частью, акцентированной со стороны курдонера двухмаршевой открытой лестницей, ведущей в парадные апартаменты второго этажа (см. рисунок 9).

Творчество зодчих русского стиля середины XIX в. основано на обращении к яркой национальной и самобытной монументальной архитектуре русского средневековья и возвращению к русскому стилю, особенно в архитектуре храмов-усыпальниц, часовен, склепов.

Так, в Мокве Нелидовых, южнее дома-дворца в 1848 г. была построена кирпичная двухэтажная церковь Спасская, со склепом-усыпальницей в нижнем этаже. В отличие от дворца, небольшой семейный храм был выстроен с элементами русского стиля. Церковь представляла собой центрический храм без колокольни. К круглому объёму примыкали с четырех сторон прямоугольники: перспективного портала, апсиды и лестниц, делая здание крестообраз-

разным в плане. Храм завершал большой купол на высоком световом барабане. Престолов в церкви два: в нижнем этаже во имя преподобного Аркадия, в верхнем - Нерукотворного Образа Господа Иисуса Христа [5] (см. рисунок 10).

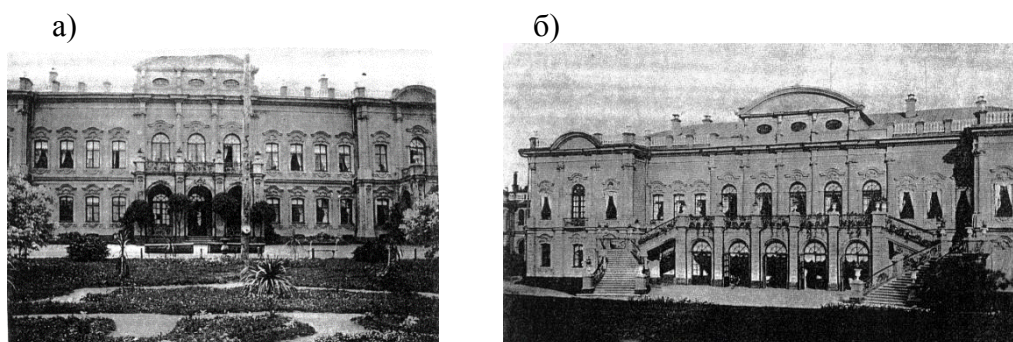


Рисунок 9 – Дворец Клейнмихелей в усадьбе «Ивня». Фото начала XX в. Семейный архив О.К. Вороновой, урожденной Клейнмихель (Париж): а) южный фасад, б) северный фасад

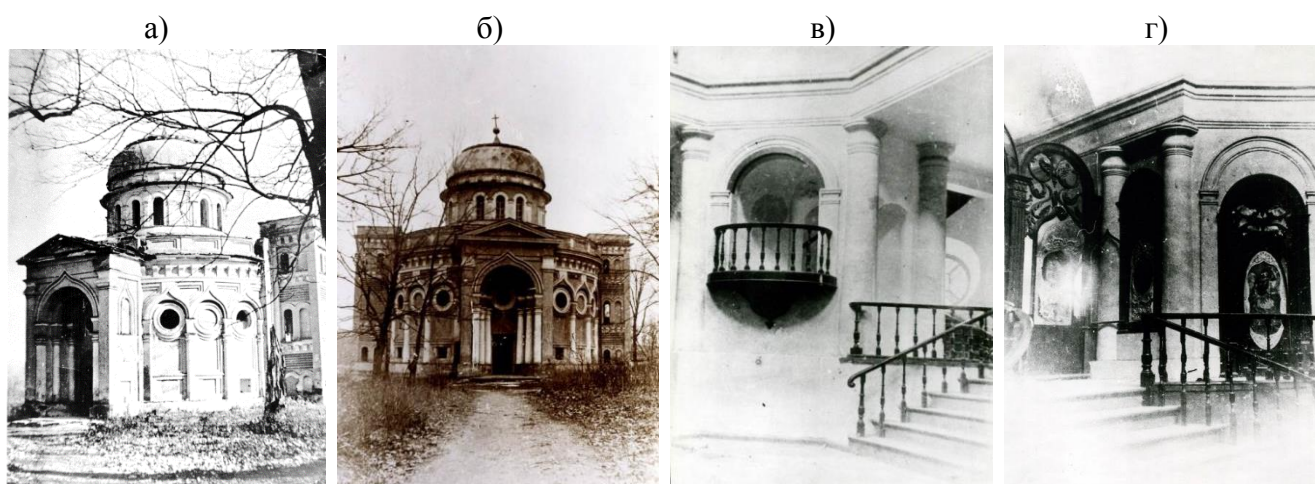


Рисунок 10 – Спасская церковь-усыпальница в усадьбе Нелидовых «Моква». Фото начала 1960-х гг.: а) – б) виды со стороны главного входа, в) – г) фрагменты интерьера 1-го этажа

В порубежной Курской губернии, расположенной на перекрёстке двух культур, фольклорная тема русского стиля, ориентируемая на народное искусство – крестьянскую избу, отражает черты русско-украинских традиций народного зодчества – это относится, в основном, к жилым и хозяйственным постройкам мелкопоместных усадеб (см. рисунок 11-14), благотворительным зданиям (больницы, школы, приюты и др.).

Это довольно простые деревянные или кирпичные, преимущественно одноэтажные здания и целые комплексы, с асимметричной композицией объёмно-планировочного решения и элементами народной архитектуры. Например, главные усадебные дома, флигели и службы в Уколове, Малеевке, Нижнем Теребуже, Уютном (см. рисунок 11).

Художественное оформление домов Курской губернии, в сравнении с северными губерниями, было развито слабо. Декоративное убранство, как деревянных, так и кирпичных зданий, представлено в виде несложной плоской (позднее пропиленной) резьбы и довольно скромно выражено в резных деревянных подзорах карнизов, наличниках окон и дверей, ставнях, отделки веранды, ограждений террасы и лестницы. Кронштейны, поддерживавшие свесы крыши, кое-где обрабатывались скульптурно в виде завитков и других украшений.

Сведения о строительных материалах и типах усадебных построек, сохранились по информации в основном для мелкопоместных усадеб.

До настоящего времени в некоторых сёлах бывшей Курской губернии (Курская, Белгородская, часть Сумской областей) сохранились некоторые типы кирпичных хозяйственных и жилых построек (см. рисунок 12), а также рубленые и плетневые хозяйственные строения –

мельницы, амбары, пуньки, повалени (реже жилые хаты) под соломенными крышами, отражающие облик застройки прошлых столетий (см. рисунок 13, 14).

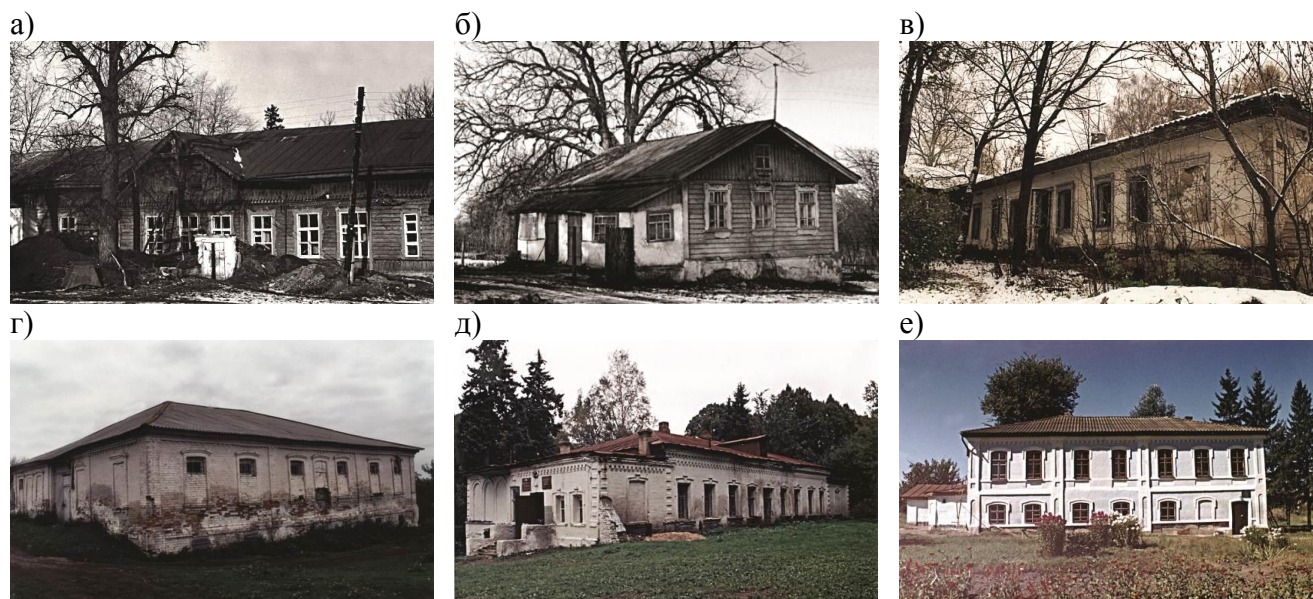


Рисунок 11 - Примеры главных домов мелкопоместных усадеб. Фото Е.Холодовой, нач. 2000-х гг.: а) – б) Малеевка, в) Нижний Теребузж, г) Семёновка, д) Ишутино, е) Яцыно

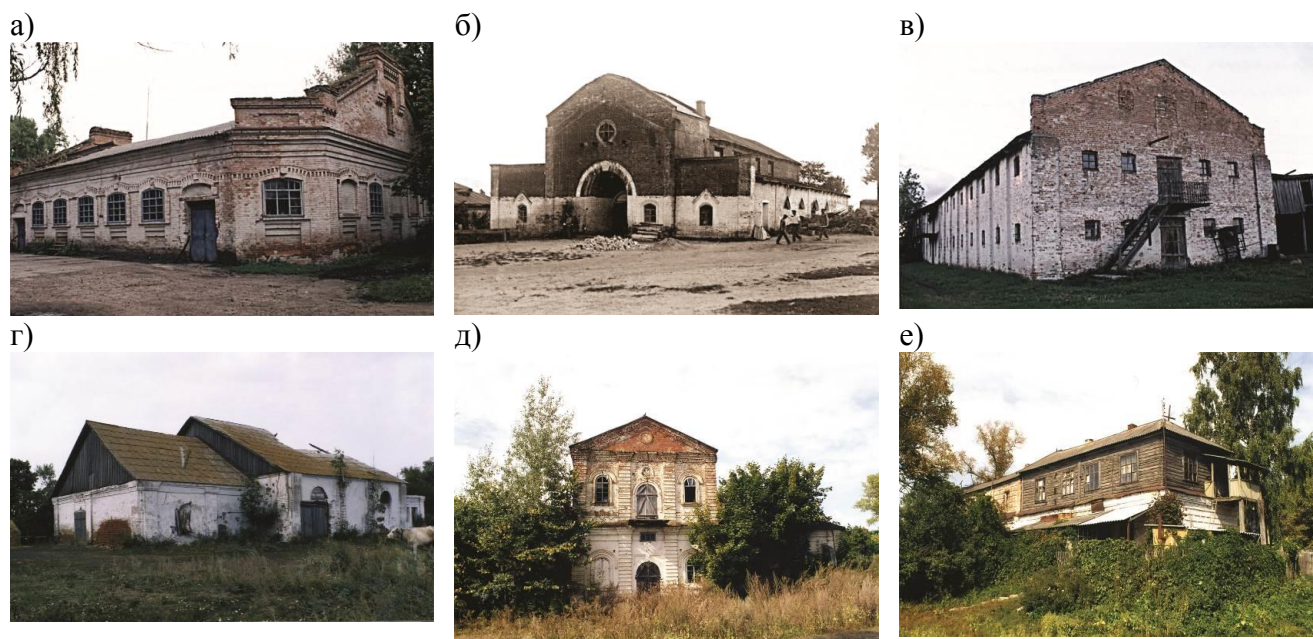


Рисунок 12 – Типы кирпичных хозяйственных построек. Фото Е. Холодовой 2000-х гг.: а) Хомутовка – конюшня, б) Моква – манеж и конюшня, фото 1920-х гг., в) Прилепы – мельница, г) Борзень – конюшня, д) Белый Колодезь - железнодорожный вокзал, е) Белый Колодезь – контора

На выбор строительных материалов влиял региональный природно-географический фактор и возможности владельцев.

Вплоть до сер. XIX в. преобладали деревянные срубные владельческие постройки [8, с.72-73]. В исследуемой лесостепной зоне, преимущественно широколиственных лесов, на строительстве использовали: дуб, осину, вербу, липу, ольху [8, с.72-73].

В конце XIX – начале XX вв. в связи с оскудением лесов [9], удорожанием лесоматериалов срубная техника строительства стала сочетаться уже с другими строительными приёмами, требующими меньшего количества дерева. В столбовой технике строили также амбары, гумна, иногда сараи (см. рисунок 14).

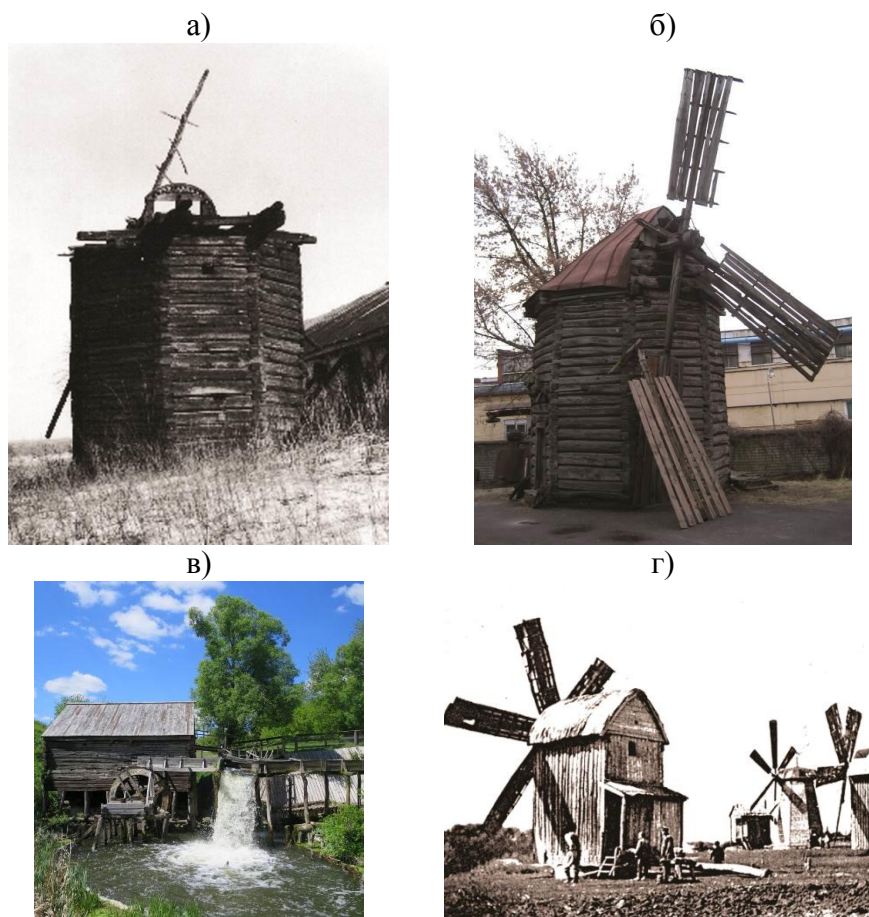


Рисунок 13 – Типы деревянных мельниц. Фото Е. Холодовой 1990-х, 2000-х гг.: а) Семёновка – ветряная мельница, б) ветряная мельница из Щигровского уезда во дворе Курского областного краеведческого музея, в) Красниково – водяная мельница, г) ветряные мельницы Суджанского уезда, фото нач. XX в.

Недостатки местного лесоматериала сказались в традиции обмазывать сруб снаружи и внутри глиной и белить. В середине XIX в. обмазка сруба, с последующей побелкой, в Курской губернии была более характерной для южных уездов с преобладающим украинским населением [8, с.75].

В исследуемой зоне сравнительно много (по отношению к другим русским губерниям) строилось домов из естественного камня – мела, плитняка (разновидности известняка), песчаника. Это объясняется наличием мощных выходов горных пород, пригодных для строительства (мел, мелоподобные мергели, известняк) в бассейне Дона, Северского Донца, Оскола и Псла. Такие материалы, как мел и песчаник широко применялись – для строительства погребов, амбаров в южных и юго-западных уездах Курской губернии [8, с.91]. Нередким явлением были и саманные постройки, преимущественно хозяйственные.

Крыша традиционного жилища на всей территории губернии была четырёхскатной [8, с.91]. Кровельным материалом, наиболее распространённым в исследуемом, как и в других центральных земледельческих районах была солома, что связано с развитием зернового пашенного земледелия и постепенной вырубкой леса [8, с.92]. Отмечались примеры покрытия крыш камышом. "Делали с большим искусством под гребенку, толщиной около трёх вершков, и до того прочны, что бываю совершенно непромокаемы", – утверждает современник [10, с.13-14]. У богатых владельцев было железное (см. рисунок 15) и черепичное покрытие, как жилых, так и хозяйственных усадебных зданий. Покрытие тёсом, в связи с недостатком лесоматериалов использовали довольно редко.

В устройстве хозяйственных строений наблюдалось большое разнообразие "начиная от плетневых стен, обмазанных с обеих сторон глиной и крышей из соломы и, кончая солидными

каменными постройками, крытыми железом – светлыми, прекрасно вентилированными с отдельными стойлами для животных"[11,с.35, с.79А-80А].

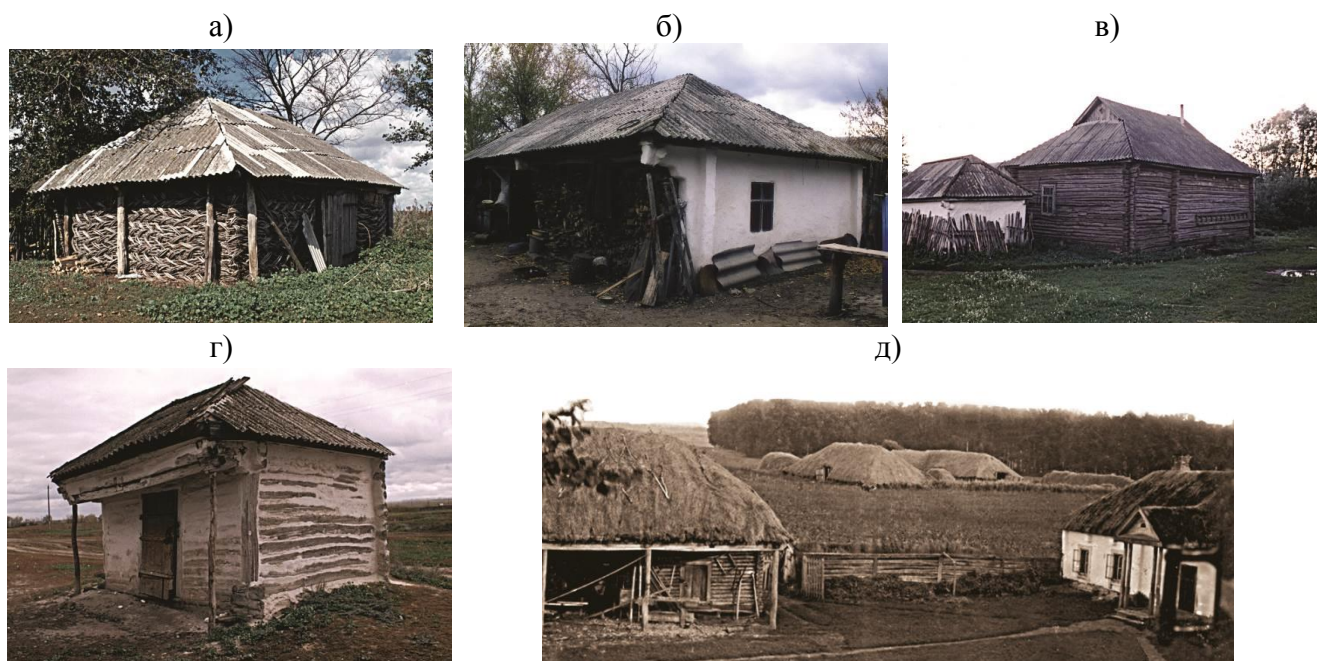


Рисунок 14 – Типы деревянных хозяйственных построек. Фото Е. Холодовой 1990-х, 2000-х гг.: а) Сухой Ровец, б) Покровское, в) Прилепы, г) Покровское, д) Старое Першино, фото нач. XX в.

Простейшие, сходные с крестьянскими, хозяйственные постройки были даже в известных образцовых хозяйствах.

Приводится так же пример: "...В имении Гридасово у Климова возводятся достойные замечания постройки: мазанковые строения с двойными стенами (плетнями глиною обмазанные в расстоянии $\frac{1}{4}$ арш.) промеж которых набивается земля. Такого рода постройки похожи на Герардовские с тою только разницей, что вместо кирпичных стен воздвигаются плетни, и вместо золы набивается земля такого рода постройки должны быть очень теплы и сухи" [12, с.88].

Однако, новейшие течения архитектуры в рассматриваемый период были возможны лишь для владельцев средних и крупных имений. Большинство мелкопоместных усадеб носили черты крестьянской архитектуры со строительными приёмами характерными для данного региона.

Примечательной чертой усадеб «золотого века» стало создание музейных комнат и залов, содержащих семейные и художественные реликвии (см. рисунок 16). Особую гордость семьи представляли интерьеры барских домов со старинной мебелью и галереей семейных портретов [13, с.46; 14, с.332]. Одной из самых крупных и значительных, безусловно, была коллекция Барятинских в курском имении Марьино (см. рисунок 17). Сам основатель усадьбы князь И.И. Барятинский и его потомки, имея страсть к редким и ценным вещам, преумножали знаменитое художественное собрание марьинского дворца в течение XIX – начале XX вв. великолепными произведениями русского и западноевропейского искусства [6, с.52-66].

Были так же хорошо известны своими богатыми собраниями картин, фарфора, бронзы усадьба Моква Нелидовых (затем Волковых), Ивня Клейнмихелей и др. Славилась нумизматическими коллекциями и коллекциями серебра, фарфора и хрусталя усадьбы Кандаурова, Данзаса, Логовского и др. [15].

Созданию домашних музеев так же способствовало увлечение коллекционированием древностей, занятие археологическими раскопками, находившимися на территории имений.

Обращение к исторической памяти, родовым корням проявилось большим вниманием к благоустройству старых и строительству новых семейных некрополей – перезахоронение

предков, устройство семейных усыпальниц (см. рисунок 18). Последние приюты владельцев имений и их окружения (нередко прислуги) располагались преимущественно – в оградах домашних и приходских храмов, парках и садах усадеб, реже – на общественных сельских или городских кладбищах.

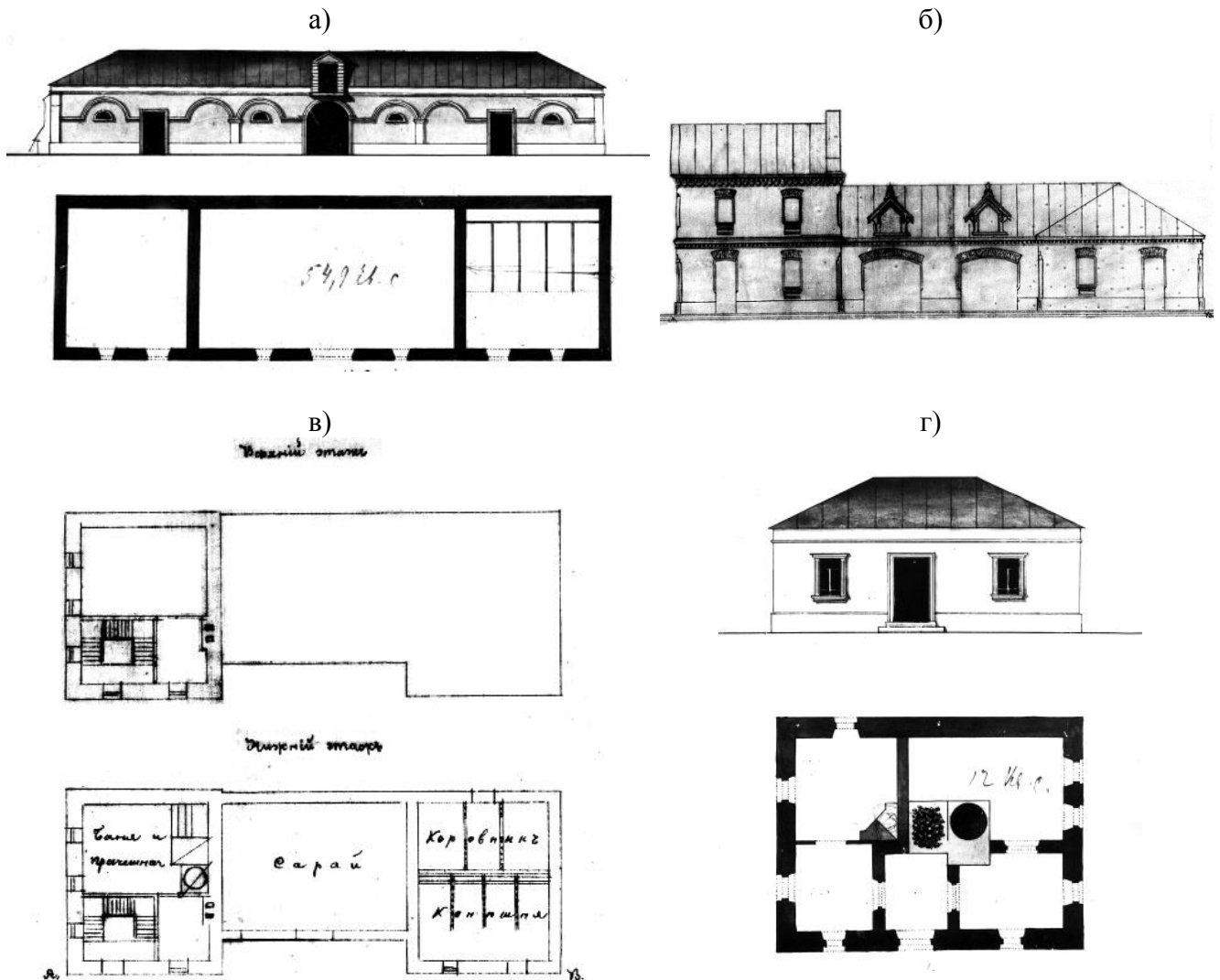


Рисунок 15 – Проект хозяйственных построек в имении Шереметевых «Михайловка» 1875-1876 гг. Архитектор Серебряков. Российский государственный исторический архив (РГИА). Ф.1088. Оп.6. Д.1813.: а) конюшни, коровник и экипажный сарай, б) службы, в) – г) планы и фасад экипажного сарая, коровника и прачечной



Рисунок 16 – Дворянский зал (коллекций крупных усадебовладельцев) Курского областного краеведческого музея. Фото А. Малахов, 2011 г.

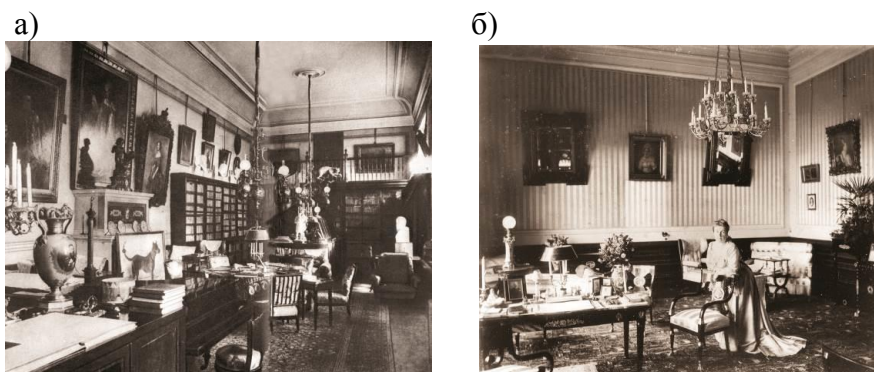


Рисунок 17 – Вид интерьеров усадьбы «Марьино» Бяратинских с фамильными художественными коллекциями. Фото нач. XX в.: а) кабинет, б) жилая комната

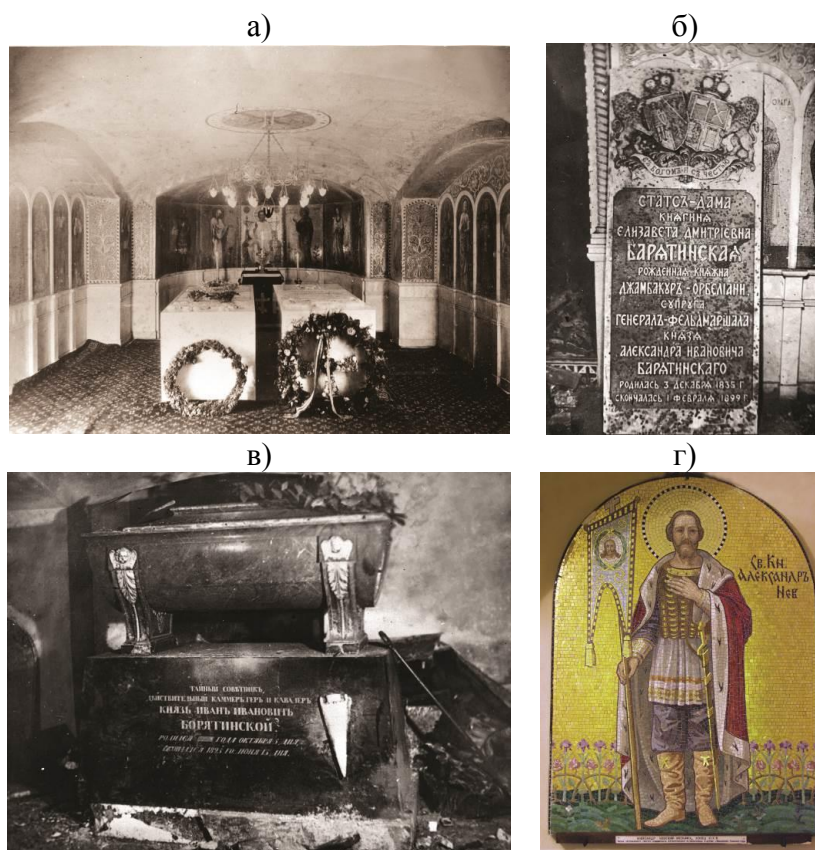


Рисунок 18 – Усыпальница семьи Бяратинских в с. Ивановском близ усадьбы «Марьино». Фото из коллекции документов КОКМ нач. XX в.: а) интерьер усыпальницы, б) – в) надгробные памятники, г) пример мозаичной иконы в интерьере усыпальницы

Устройство семейного некрополя было различно: надгробные плиты, простые и символические монументальные памятники, в основном, из натурального камня (песчаник, мрамор, гранит), реже – из кирпича, а также сооружения – храмов-усыпальниц, мавзолеев, склепов различной величины и стилей – из кирпича и позднее из железобетона.

Выводы

Как видно из исследования, стилистическое формирование новых комплексов и отдельных усадебных зданий было различным.

Многие усадьбы имели подчёркнутую ансамблевость. Не исключением была и разно-стильность вновь созданных и реконструируемых усадеб.

Эпизодическое участие в строительстве загородных имений Курской губернии столичных архитекторов и специалистов, подготовленных в Москве и Петербурге, способствовало проникновению в провинцию новых архитектурных стилей и относительно высокому художественному уровню отдельных построек и целых комплексов, преимущественно в передовых образцовых хозяйствах и экономических посёлках.

В создании внутреннего пространства усадебного дома учитывалась практичность и рациональность, а также традиционная связь с окружающей природой, где жилые комнаты и рабочие кабинеты были обращены во двор, а парадные – для отдыха и приёма гостей открывались в парк. Преимущественно усадебные дома отличались сравнительно небольшими масштабами и площадью помещений.

Документальные свидетельства и сохранившиеся типы зданий говорят, что усадебные дома и архитектурные ансамбли 2-й половины XVIII – 1-й половины XIX вв. создавались в общероссийском художественном русле.

Таким образом, в основной схеме развития загородного усадебного строительства Курского края периода «Золотого века» прослеживаются несколько этапов. В 1780 – 1840-е гг. архитектура усадебных зданий развивалась преимущественно в русле классицизма и параллельно ему в первой половине XIX в. проявления эклектики в формах романтизма и в дальнейшем историзма, но отличалась некоторой упрощённостью и стилизаторским направлением, в основе которого было обращение к историческому наследию. Причем данные тенденции относятся преимущественно к крупным и некоторым среднепоместным усадьбам.

Благодарности

Исследование выполнено за счет средств Государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013-2020 годы в рамках Плана фундаментальных научных исследований Минстроя России и РААСН, тема 1.2.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Музей архитектуры имени Щусева (МУАР). Проект дворца в усадьбе «Марьино» Барятинских. Шифр хранения Р V-4152-3
- Знаменитые россияне XVIII-XIX веков. Биографии и портреты. СПб.: Лениздат, 1996. С. 869-870.
- Из истории Курского края. Сборник документов и материалов / Сост. Ф.Ф. Лаппо, В.Г. Плющев, С.Г. Поскребышева, А.С. Травина. Воронеж: Центрально-Чернозёмное книжное изд-во, 1965. С.114-116.
- Холодова Е.В. Головчино: История, архитектура, гипотезы. Белгород: "Везелица", 2003. 56 с.
- Холодова Е.В. Усадьбы Курской губернии: Историко-архитектурные очерки. Приложения: Свод загородных усадеб, храмов и монастырей Курской области. - Курск: ТОО "Крона", 1997. – С.27.
- Фёдоров С.И. Марьино князей Барятинских. – Курск: Крона, 1994. – 224 с.
- Государственный архив Курской области (ГАКО). Ф.Р-3139. Курский областной краеведческий музей. Оп.1. Д.25.
- Чижикова Л.Н. Русско-украинское пограничье. История и судьбы традиционно-бытовой культуры (XIX-XX века). М.: Наука, 1988. 251с.
- Цветков М.А. Изменение лесистости Европейской России с конца XVII столетия по 1914 год. М.: Изд-во АН СССР, 1957. С.128-129.
- Нежданов И. Описание хозяйства слободы Чернянки имения тайного советника М.П. Шербинина Курской губернии Новооскольского уезда // Тр. ВЭО. СПб.: Тип. т-ва "Общественная польза", 1865. Т. 3. С. 13-14.
- Чуйков Н. А. Курская губерния в сельскохозяйственном отношении: Отчёт по командировке в 1893 г. от Имп. Моск. о-ва сельского хозяйства Н.А. Чуйкова. М.: Т-во скоропечатни А. А. Левенсон, 1894. [6], 104 с.
- Юревич П. Агрономические путешествия по России. Сельскохозяйственные наблюдения по дороге из Коренной в Харьков // Журнал Министерства Государственных Имуществ. 1852. Ч. XLIV. №7. С. 89-90, 93.
- Марков А. (Шарки). Родные гнёзда. Сан Франциско, 1962. 224 с.
- Воронова О.К. Путешествие в Ивню /публикация Е.В. Холодовой // Дворянские гнёзда России: История, культура, архитектура: Очерки / Под ред. М.В. Нащокиной. М.: Жираф, 2000. С.330-334.
- Молчин А. Курский государственный музей // Известия Курского о-ва краеведения. Курск: Изд. Курского губ. Общества Краеведения, 1928. №3(9). С.73.

REFERENCES

1. Shchusev Museum of architecture (MUAR). Project of the Palace in the manor "Marino" Baryatinsky. Storage code P V-4152-3.
2. Famous Russians of the XVIII-XIX centuries. Biographies and portraits. - Saint Petersburg: Lenizdat, 1996. P. 869-870.
3. From the history of the Kursk region. A collection of documents and materials / Ed. F.F. Lappo, V.G. Plumeau, S.G. Poskrebyshv, A.S. Travin. Voronezh: Central Chernozem book publishing house, 1965. P. 114-116.
4. Kholodova E.V. Golovchino: History, architecture, hypotheses. Belgorod: "Veselitsa", 2003. 56 p.
5. Kholodova E.V. Homesteads of Kursk province: Historical and architectural essays. Applications: Arch of country estates, churches and monasteries of the Kursk region. Kursk: Krona LLP, 1997. P. 27.
6. Fedorov S.I. Maryino of the Baryatinsky princes. Kursk: Krona, 1994. 224 p.
7. State archive of the Kursk region (GAKO). F. R-3139. Kursk regional Museum of local lore. Op. 1. D. 25.
8. Chizhikova L.N. Russian-Ukrainian Borderlands. History and destinies of traditional household culture (XIX-XX centuries). Moscow: Nauka, 1988. 251 s.
9. Tsvetkov M.A. Change of forest cover in European Russia from the end of the XVII century to 1914. Moscow: Publishing house of the USSR Academy of Sciences, 1957. Pp. 128-129.
10. Nejdjanov I. Description of the economy of the Chernyanki settlement of the estate of the privy Councilor M. P. Sherbinin of the Kursk province of Novooskolsky uyezd // Tr. VEO. SPb.: Type. t-VA "Public benefit", 1865. Vol. 3. P. 13-14.
11. Chuikov N. A. Kursk province in agricultural terms: Report on a business trip in 1893 from Imp. Mosk. o-VA agriculture N.A. Chuikova. M.: T-vo skoropechatni A.A. Levenson, 1894. [6], 104 p.
12. Yurevich P. Agronomic travels in Russia. Agricultural observations on the road from Korennaya to Kharkiv. *Journal of the Ministry of State Property*. 1852. Part XLIV. no. 7. Pp. 89-90, 93.
13. Markov A. (Sharkey). Native nests. San Francisco, 1962. 224 p.
14. Voronova O.K. Journey to Ivnya / publication By E.V. Kholodova // Noble nests of Russia: History, culture, architecture: Essays / ed. by M. V. Nashchokina. Moscow: Giraffe, 2000. Pp. 330-334.
15. Malkin A. Kursk state Museum. News of Kursk Islands of history. Kursk: Publishing House. Kursk region. Society Of Local History, 1928. №3(9). P. 73.

Информация об авторах

Холодова Елена Васильевна

Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства (НИИТИАГ) Филиала ФГБУ "ЦНИИП Минстроя России", г. Москва, Россия,
ведущий научный сотрудник, кандидат архитектуры, член Союза архитекторов России, советник РААСН.
E-mail: tora-9@yandex.ru

Information about authors

Kholodov Elena V.

Research Institute of theory and history of architecture and urban planning (NIITAG) branch of "tsniip of the Ministry of construction of Russia", Moscow, Russia,
leading researcher, candidate of architecture, member of the Union of architects of Russia, Advisor of RAACS.
E-mail: tora-9@yandex.ru

С.И. БАЖЕНОВА¹, В.А. АЛЕКСЕЕВ¹

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

ОСОБЕННОСТИ ПОДБОРА СОСТАВА ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ВЯЖУЩИХ ДЛЯ ИНЪЕКТИРОВАНИЯ

Аннотация. Применение инъекционных смесей на основе тонкодисперсных минеральных вяжущих (иначе называемых микроцементами), предназначенных для инъекционного формирования укреплённых массивов (грунтобетон) в проницаемых грунтах (пески всех видов) обуславливает экономическую целесообразность их применения при решении широкого спектра различных геотехнических задач. Для правильного назначения параметров применения тонкодисперсных вяжущих при инъектировании грунтов разработаны соответствующие критерии оценки их свойств. Однако малоизученным остается вопрос назначения расходов сырьевых материалов для получения грунтобетонных конструкций и закреплённых массивов с требуемыми свойствами.

На сегодняшний день в РФ практически не представлена нормативная база для тонкодисперсных вяжущих (микровяжущих), применяемых в инъектировании, отсутствует научная база формирования грунтобетон, формируемых с помощью инъекции, в.т.ч. нет адекватных зависимостей наподобие формулы Боломея-Скрамтаева для бетона отражающая получаемую прочность от расхода и качества компонентов. Авторами проведен ряд опытов, показывающих неприменимость основных закономерностей для обычных бетонов при создании грунтобетон, получаемых методами инъектирования.

Рассмотрены различные виды тонкодисперсных вяжущих, применяемых в геотехническом строительстве. В качестве контрольных параметров сравнивался гранулометрический и минеральный состав тонкодисперсных вяжущих, оценивалась проникающая способность при разных режимах приготовления и нагнетания инъекционной смеси в грунты, характеристики полученного грунтобетона. Также сравнивались две технологии создания грунтобетона – путем механического перемешивания и по способу инъекционной пропитки контрольных образцов песчаного грунта на предмет соответствия принципам подбора составов действующих нормативных документов для тяжелых и легких бетонов.

Подтверждены значительные отличия свойств грунтобетона, полученного по методам инъекционной пропитки (традиционных грунтобетон) и перемешивания (как для обычных бетонов). Исследования подтвердили возможность инъекционной пропитки вяжущими определенного грансостава в целях укрепления песчаных грунтов в соответствии с назначенными технологическими параметрами. Показаны коэффициенты эффективности использования микровяжущих при инъектировании, отражены данные по свойствам образуемого грунтобетона при разных технологических параметрах.

Ключевые слова: тонкодисперсное вяжущее, инъектирование, укрепление грунтов, грунтобетон, микроцемент, микронаполнитель, пропиточная инъекция.

S.I. BAZHENOVA¹, V.A. ALEKSEEV¹

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia

FEATURES OF SELECTING THE COMPOSITION OF FINE-DISPERSE BINDERS FOR INJECTION

Abstract. The use of injection mixtures based on finely dispersed mineral binders (microcements) intended for injection formation of hardened massifs (soil concrete) in permeable soils (sands of all kinds) makes them economically feasible in solving a wide range of different geotechnical problems. For

the correct assignment of the parameters for the use of finely dispersed binders for the injection of soils, appropriate criteria for assessing their properties have been developed. However, the question of assigning the consumption of raw materials to obtain soil concrete structures and hardened massifs with the required properties remains poorly studied.

Nowadays, the regulatory framework for finely dispersed binders (micro binders) used in injection is practically not presented in the Russian Federation. There is no scientific basis for the formation of soil concrete formed by injection, including there are no adequate dependencies like the Bolomey-Skramtaev formula for concrete, which reflects the resulting strength from the consumption and quality of the components. The series of experiments were conducted, showing the inapplicability of the basic laws for standard concrete when creating soil concrete obtained by injection methods.

Various types of finely dispersed binders used in geotechnical construction are considered. As control parameters, the particle size and mineral composition of finely dispersed binders were compared. There were assessed penetration at different modes of preparation and injection of the injection mixture into the soil, and the characteristics of the resulting concrete. Two technologies for creating soil concrete - by mechanical mixing and by the method of injection impregnation of control samples of sandy soil were compared for compliance with the principles of selecting the composition of existing regulatory documents for heavy and light concrete.

Significant differences between the properties of soil concrete obtained by the methods of injection impregnation and mixing are confirmed. Studies have confirmed the possibility of injection impregnation with binders of a certain composition in order to strengthen sandy soils in accordance with the assigned technological parameters. The coefficients of the efficiency of the use of micro binders during injection are shown, data on the properties of the formed soil concrete at different technological parameters are reflected.

Keywords: *fine-disperse binder, injection, soil hardening, soil-concrete, microcement, micro-filler, impregnation injection.*

Введение

Расширение мегаполисов и крупных городов Российской Федерации ставит задачу максимально эффективного использования подземного городского пространства. Дефицит парковочных мест и требования сохранения исторического облика в центральных частях города в условиях плотной городской застройки, обуславливают необходимость интенсивного освоения подземного пространства [1]. Необходимость выполнения работ при строительстве подземных сооружений в крайне сложных геотехнических условиях, предполагает применение комплекса специальных методов производства работ, обеспечивающих уплотнение, стабилизацию и упрочнение грунтов, ликвидацию водопроявлений через ограждающие конструкции, защита от возможных деформаций и выравнивание зданий и сооружений в случае проявившихся сверхнормативных деформаций и т.д.). Кроме того, обеспечение безаварийного выполнения работ по освоению подземного пространства в условиях постоянно функционирующих зданий и сооружений, требуют внедрения новых строительных технологий и материалов с повышенными требованиями к безопасности, щадящему воздействию на окружающую застройку, малогабаритности и к уровню шума при производстве работ [2]. При этом, оценка эффективности практического применения инъекционных методов производства работ с применением тонкодисперсных вяжущих, в отличие от традиционных с применением общестроительных цементов или полимерных систем, должна учитывать не только стоимость и сроки выполнения работ, но и специальные требования, предъявляемые к работам в условиях плотной застройки [4, 5].

Инъекционные работ в режиме пропитки структуры грунта позволяют не допускать деформаций грунтового массива, не допуская осадок окружающих сооружений. При этом, в качестве основного инъекционного материала используются гидравлические вяжущие высокой степени дисперсности, которые позволяют проходить через открытые поры грунта (без гидроразрывов), не изменяя напряженно-деформированное состояние (НДС) грунта [5]. Такие вяжущие получили название микровяжущие, микроцементы или ОТДВ – особо тонкодисперсные вяжущие, которые в настоящее время достаточно широко применяются при решении различных геотехнических задач. Анализ российского и зарубежного опыта реализации про-

ектов инъекционного закрепления различных грунтов позволяет с уверенностью заявлять о высокой степени эффективности методов инъектирования, особенно применительно в условиях сложившейся инфраструктуры городов, имеющих высокую степень насыщенности подземными коммуникациями, сложной инженерной геологией и сооружениями, находящимися в зоне влияния подземного строительства. Инъекционная технология цементационного формирования грунтового массива основана на пропитке структуры грунта в режиме низконапорной подачи при малых давлениях (до 0,5 МПа). При этом, в процессе нагнетания инъекционная смесь полностью заполняет поровую структуру грунта, (кроме закрытых пор) без нарушения его природной структуры [6]. При случаях, когда закрепляемый грунт находится в состоянии полного водонасыщения, инъекционная смесь в процессе пропитки вытесняет грунтовую воду, обеспечивая формирование грунтобетонного массива, по своим показателям сравнимого со строительными растворами и мелкозернистыми бетонами [7].

Анализ реализованных проектов уплотнения и упрочнения грунтов доказывает, что метод инъекционной пропитки максимально удовлетворяет требованиям, предъявляемым к геотехническим спецработам в условиях подземного городского строительства [8]. Следует отметить, что качество работ определяется соблюдением регламента инъектирования, тщательностью выполнения работ с учетом выполняемых методов контроля и правильностью выбора типа ОТДВ с учётом фактических геотехнических условий и проектных задач. Гранулометрический состав ОТДВ, в отличие от применяемых в строительной практике других вяжущих для цементации состоит в том, что они производится способом воздушного сепарирования подготовленных композиционных вяжущих или сырьевых материалов на минеральной основе с последующей гомогенизацией состава [22]. Причем, качество ОТДВ необходимо оценивать не столько по показателю удельной поверхности, как обычно производители пытаются классифицировать ряд строительных микроцементов, а по грансоставу зерен с интегральной кривой - d10, d50, d95. Гранулометрическая характеристика различных тонкодисперсных вяжущих представлена в табл. 1.

Табл. 1. Виды ОТДВ и эффективность их применения.

Параметр\марка	Интроцем Экстра	Microdur R-X	Spinor A12	Rheocem 900	Микролег 10
Размер частиц, d95<	5,5	6	7	8	9
В/Вяз отношение (рекоменд.)	4	4	2	3	1
Стоимость 1 тн. материала, руб.	80000	120000	180000	150000	180000
Удельная эффек- тивность (Куэ)	1,25	0,83	0,16	0,27	0,13

Сбалансированность и стабильность гранулометрического и химико-минералогического состава тонкодисперсного вяжущего может быть обеспечена только высоким уровнем технологичности производства и воспроизводимости свойств смесей для инъекционной пропитки, что гарантированно позволяет достигать заданных проектных показателей грунтобетонного массива (ГБМ) [5, 9].

Как правило главными технологическими критериями инъекционных смесей на основе ОТДВ считаются:

- низкая величина седиментации при приготовлении и нагнетании;
- высокая степень пенетрационной способности при пропиточной инъекции капиллярно-пористого массива грунта под низкими давлениями;
- высокий показатель сохраняемости смеси позволяющих обеспечить непрерывность технологического процесса (приготовление, выдержка, нагнетание) до начала первых признаков схватывания;

- стабильность характеристик составов ОТДВ для всех поставочных производственных партий;

Параметры наиболее широко используемых в строительной отрасли марок тонкодисперсных вяжущих от разных производителей представлены в табл.1.

Представленные микроцементы с разной степенью эффективности используются при решении разнообразных строительных проблем. Однако, ввиду разнообразия задач, как на стадии проектирования, так и на стадии строительства необходимо обеспечивать требуемый уровень эффективности применения ОТДВ. Так, повышение экономической эффективности решения задач усиления грунтов с применением ОТДВ возможно за счёт использования композиций, состоящих из комбинации базовых ОТДВ и микронаполнителей [5]. При использовании химических добавок, повышающих пенетрационную способность и технологические свойства инъекционной смеси, существенно снижается стоимость и сроки работ [6, 10].

Модели и методы

При назначении технологических решений и типа ОТДВ, подбора инъекционных составов и требований к ним, необходимо учитывать, что основные закономерности бетоноведения не всегда приемлемы для формируемых грунтобетонных масс. Так, зафиксированные параметры грунтобетона, созданного методом механического перемешивания грунта и инъекционной смеси ОТДВ, не соответствуют полученным характеристикам грунтобетонного массива (ГБМ), созданного путем инъекционной пропитки аналогичных грунта и суспензией микроцемента.

Исследуемые композиционные вяжущие изготавливались путём гомогенизации базового ОТДВ и соответствующих минеральных микронаполнителей.

В экспериментальных работах оценивалась качественная характеристика тонкодисперсного вяжущего и его пригодность формировать грунтобетонный массив по технологии инъекционной пропитки (с фиксацией параметров технологии и последующим выбуриванием кернов). Для сравнительного анализа выполнялось механическое перемешивание инъекционной смеси с исследуемым песчаным грунтом с последующим исследованием его характеристик.

Прочность грунтобетона при сжатии, приготовленного путем инъекционной пропитки, оценивалась с учетом прочности грунтобетона, созданного методом механического перемешивания с фиксацией кинетики твердения при различных показателях водовяжущего отношения. Количественная характеристика сравнения выражалась эмпирическим коэффициентом упрочнения «Ку»:

$$K_y = R_{п} / R_c \quad (1)$$

$R_{п}$, МПа – прочность образца при сжатии грунтобетонного массива, созданного методом инъекционной пропитки;

R_c , МПа – прочность образца, созданного способом перемешивания.

Помимо прочностных показателей оценивалась характеристика поровой структуры образованного грунтобетона методом ртутной порометрии. С применением РФА и ДТА выполнялось исследование продуктов гидратации.

Результаты исследования и их анализ

Согласно классической теории бетоноведения, характеристики затвердевшего бетона определяются главным образом соотношением компонентов бетонной смеси в системе «вяжущее - крупный и мелкий заполнитель – вода - добавки». При анализе свойств грунтобетона установлено, что при равном количестве вяжущего в составе грунтобетона, приготовленного при технологии инъектирования и при механическом смешивании, прочностные характеристики грунтобетона значительно отличаются и не коррелируются между собой.

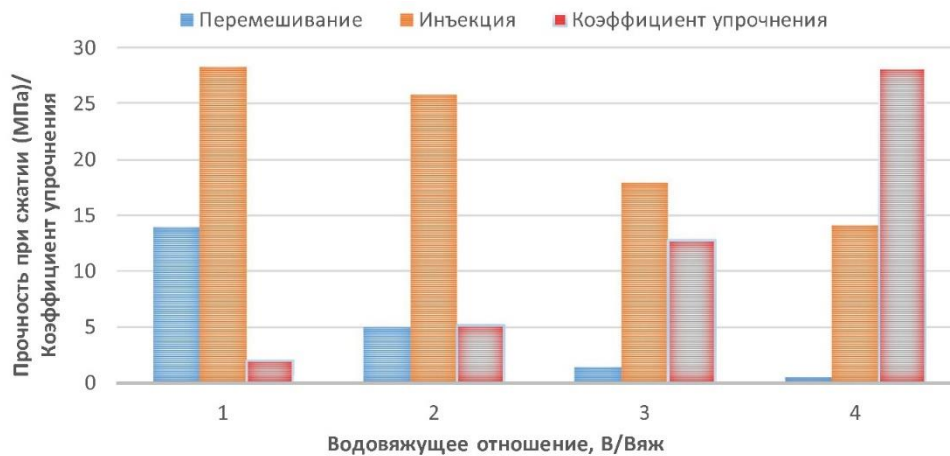


Рисунок 1 - Сравнительный анализ прочности при сжатии грунтобетона, приготовленного методом инъекционной пропитки и путем механического перемешивания (В/Вяз=1,0-5,0)

Это можно объяснить тем, что при механическом перемешивании грунта с инъекционными смесями высокой степени водонаполненности с водовяжущим отношения до В/В=5,0, имеющегося количество цементного теста недостаточно даже для обволакивания отдельных частиц грунта, что препятствует формированию грунтобетона плотной сплошной структуры. В процессе исследований также установлено, что при механическом перемешивании происходит разуплотнение естественно слежавшегося грунта и в структуру смеси раствора вяжущего и грунта вовлекается избыточный объем воздушной фазы, что является важной причиной пониженной прочности в т.ч. при неправильно назначаемых методах контроля [11].



Рисунок 2 - Физическая модель грунтового массива, инъекционно закрепляемого суспензиями тонкодисперсных вяжущих

При инъекционной пропитке грунта ненарушенной природной структуры, при заполнении их поровой структуры суспензиями ОТДВ, большая часть капиллярно-порового объема грунтового массива заполняется твердеющим инъекционным раствором (цементным тестом), образуя плотную связную структуру грунтобетона. Тот излишек воды, который присутствовал в инъекционной суспензии высокой степени водонаполненности для достижения высоких характеристик пенетрационной способности и реологических показателей, частично отжимается, а остаток связывается физико-химически или физически в поровой структуре закрепляемого массива. Также отмечается, что при инъекционном закреплении грунта смесями тонкодисперсных вяжущих высокой степени водонаполненности, развивается т.н. процесс обфльтрации. То есть установлено, что фактическое водовяжущее отношение инъекционной композиции, заполнившей поры пропитанного грунтового массива будет более низким, чем для того же показателя смеси непосредственно после приготовления. Вышеуказанные условия являются факторами улучшенных физико-механических свойств грунтобетона, созданного инъекционным способом по сравнению со способом перемешивания.

Сравнивая прочности грунтобетона, полученного с помощью инъекционной пропитки и перемешивания компонентов, можно отметить гораздо более высокую прочность грунтобетона, созданного инъекционным способом. Это объясняется тем, что микроструктура укрепляемого грунтового массива представляет трехкомпонентную систему, состоящую из твердых частиц естественно сложившейся упаковки, водной и воздушной фазы, частиц грунта также в большинстве случаев покрыты пленками рентгеноаморфных минералов и имеют включения пылеватых и дисперсных частиц различного состава с той или иной степенью реакционной способности. Межзерновой объем грунта обычно состоит из воздушных замкнутых и открытых пор, в ряде случаев, заполненных окружающей водной фазой при расположении грунта в зоне водонасыщенности [12].

Грунт, который закрепляется инъекционным способом, имеет естественную природную структуру с плотной зоной контакта, сложившейся природной упаковкой, зачастую близкой к максимально возможной степени уплотнения. Для грунтобетона, получаемого способом смешивания с цементным раствором, происходит разрушение природной упаковки, разуплотнения отдельных конгломератов с плотным контактом частиц, происходит дополнительная раздвижка при введении дополнительного количества воды и увеличение общей пористости ввиду дополнительного воздуховлечения при перемешивании.

Пропитывая грунтовой массив инъекционными смесями на основе ОТДВ, мельчайшие минеральные гидравлически активные частицы проникают в поровое пространство через капилляры и образуемые микроканалы, максимально осаждаются в замкнутых и полузамкнутых поровых каналах, в конце заполняя все поры минеральной цементационной смесью [13], которая гидратируя связывает весь исходный грунт в прочный конгломерат – грунтобетонный камень. Поверхностный слой зерен грунта при реакции с образуемым гидроксидом кальция, также участвует в процессе создания новообразований цементного камня в контактной зоне, что дополнительно уплотняет и упрочняет её [14].

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил установить высокую степень взаимозависимости между водовязущим отношением, интенсивностью нагнетания V (нагнетание единицы объема инъекционной суспензии за время T) и давлением нагнетания P (фиксируемое давление на выходном манометре инъекционного комплекса).

В рамках ранее проводимых научно-технического сопровождения инъекционных работ были установлены эмпирические зависимости, которые можно описать уравнением:

$$T = 461 - 40,6 V/W; \quad (2)$$

$$P = 0,233 - 0,036 V/W. \quad (3)$$

Исследование структуры грунтобетонных массивов, выполненное с применением электронной микроскопии, а также рентгенофазового и дифференциально-термического анализов показало, что микроцемент в виде наномодифицированного коллоидного раствора имеет высокую величину гидратации на ранних стадиях (непосредственно после добавления воды и замеса инъекционных смесей), что должно находить своё отражение в карте инъекционных работ и выработки суспензии с учетом её жизнеспособности. Определенно, что в порах проинъектированного грунтового массива, заполненных ОТДВ, происходит процесс гидратообразования кристаллов гидросульфатоалюмината кальция, портландита, гидросульфогеррита и гидроалюмината кальция, также присутствует гель из микрокристаллических образований высокоосновных гидросиликатов кальция.

Выполненные исследования показали, что грунтобетон, получаемый инъекционной пропиткой грунта суспензиями на основе ОТДКВ ($V/W_{\text{вж}}=1,0...3,5$) имеет прочность до 30 МПа. В то время как образцы, приготовленные путём перемешивания предварительно измельченного грунта и цементной суспензии с $V/W=4,0$ имели нулевую прочность (Рис.4).

Отмечено, что в порах системы «грунт-микровязущее» происходит формирование кристаллического сростка, состоящего из продуктов гидратации ОТДВ, а также продуктов его

взаимодействия с компонентами грунта. Причём развитие процессов гидратации на контакте раздела фаз отличаются от параметров реакции в объеме самой фазы [15]. Внутри объема любой фазы каждая молекула вещества взаимодействует с себе подобными, тогда как напротив в контактной зоне молекулы взаимодействуют также и с молекулами отличной от них химической структуры. Известно, что высокая разность потенциалов фаз способствует большому значению потенциальной энергии на поверхности контакта фазовых состояний. При высокой концентрации микрочастиц с условным диаметром менее 0,1 мкм. в поровом объеме пропитанного грунта с развитой сеткой пор, снижается энергетический порог наступления реакции гидратации [5, 15] в пересыщенном растворе компонентов вяжущего, т.е. реализуется эффект высокого уровня энергии поверхности микрочастиц и интенсификации кристаллизации в твердеющей системе [13].

Процесс гидратообразования начинается в основном в контактной зоне частицы проинъектированного грунта ввиду того, что процесс кристаллообразования в жидкой фазе более энергетически затратный процесс. Частицы новых фаз нарастают, образуя сольватную оболочку набухающих наслоений составляющих цементного теста, формируя притягивающиеся коагуляционные узлы. В пересыщенной фазе цементной системы выделяются микрокристаллические зародыши с условным диаметром 10-9 м, которые далее слипаются и коагулируют, укрупняясь (до 10-7 м) и оседая на поверхности частиц грунта, формируя грунтобетон.

Гидросиликаты кальция имеют свойство поглощать существенный объем воды в фазе образования кристаллогидратов, когда межкристалльная дистанция становится примерно равной диаметру молекулы воды. При этом совершается сращивание кристаллогидратов аналогичных фаз, происходит флуктуационное уплотнение молекул раствора затворенного вяжущего.

После пропитки суспензией микроцемента процессы гидратации начинаются в тонком слое модифицированной суспензии и поверхностью частиц, и согласно теории бетоноведения, как и в обычном бетоне свойства контактного слоя отличаются от свойств формируемого общего объема цементного камня. Состав контактного слоя зависит также от физико-химической активности грунта, что определяет характер новообразований в контактном слое. Исследования реакций, протекающих на поверхности различных грунтов: кислых - с содержанием $SiO_2 = 65\%$ (гранулит, пироксеновый кварцевый порфир, гранит); промежуточных - с содержанием $SiO_2 = 52-65\%$ (авгито-порфир) и основных - с содержанием $SiO_2 = 52\%$ (базальт, диабаз, выветренный базальт), а также ортоклаз, альбит, кварц, и карбонатные горные породы (доломит, доломитизированный известняк), зафиксировали, что в ранние сроки твердения основные породы связывают несколько больше извести, чем кислые [15].



Рисунок 3 - Баланс продуктов гидратации грунтобетона: «Интроцем Экстра»; В/Вяз=3,0; грунт – песок мелкий $M_k=1,2$

Проведенные исследования продуктов гидратации грунтобетона в капиллярно-пористой структуре проинъектированного грунта показали участие в процессе структурообразования аморфных песчаных зерен наряду с гидросиликатом, гидросульфоалюминатом кальция и портландитом (рис.3).

После завершения процесса интенсивной гидратации в грунтобетоне (28-90 суток в зависимости от типа вяжущего) происходит формирование закрепленного массива, имеющего заданные физико-механические и геометрические параметры.

Используемые инъекционные минеральные композиции ОТДВ включают в себя строго подобранный дисперсный состав из портландцементного клинкера, порошка карбоната кальция и аморфного реакционноспособного оксида кремния, щелочного и шлакового компонента (для некоторых типов микроцемента). С помощью рентгено-фазового анализа сформированного грунтобетона было установлено присутствие в его составе следующих гидратообразований: гидроалюминатов, гидросиликатов и гидросульфоалюминатов кальция, кальцита, портландита (гидроксида кальция) и иных сложных кристаллогидратов с включениями мусковита, микроклина и других минералообразующих композиций грунта, подвергаемого инъекционной пропитке с целью закрепления.

Проведенный анализ структуры грунтобетона подтвердил, что прогидратированная инъекционная минеральная композиция, заполняющая систему капилляров и пор межзернового пространство грунта, представляет собой достаточно плотную затвердевшую вяжущую композицию, плотно соединяющая соседние зерна, формируя прочную и плотную структуру, аналогичную микроструктуре мелкозернистого бетона, где роль отдельных частиц грунта играет мелкий заполнитель.

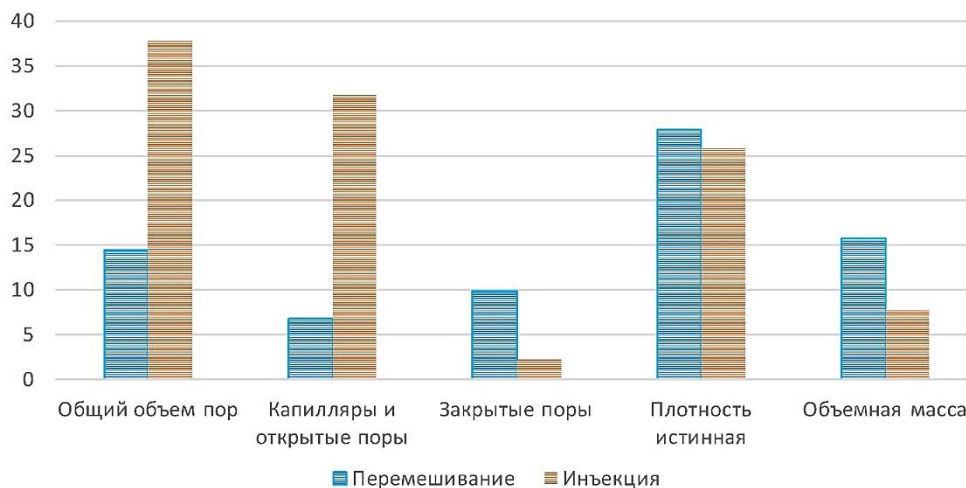


Рисунок 4 - Характеристика пористости структуры грунтобетонных образцов:
 «Интроцем Экстра»; $V/V_{\text{вяж}}=3,0$; исходный грунт - мелкий песок с модулем крупности $M_k=1,2$.

Исследование зоны контакта «цементный камень-частицы грунта» показало достаточно однородную плотную бездефектную микроструктуру массива пропитанного грунта, обеспечивающую совместный механизм восприятия нагрузок как плотного конгломерата. В грунтоцементном массиве, полученным путем перемешивания, отмечается повышенный объем пор и удельный объем капиллярной пористости (в 2,5-3 раза по сравнению с пропитанными образцами) – в среднем 85% открытых пор и капилляров и 15% закрытых.

Плотность грунтобетонного массива, полученного по методу инъекции сравнима с показателями объемной массы мелкозернистого бетона, тогда напротив, как плотность грунтобетона, полученного механическим перемешиванием сравнима с показателями плотности поризованного бетона мелкозернистой структуры.

Высокая степень однородности плотной структуры инъекционно пропитанного ГБМ формируется благодаря особенностям технологии, когда минеральная смесь ОТДВ высокой

пенетрационной способности проникает в межзерновое пространство частиц грунта, не вызывая раздвижек зерен.

Выводы

Инъекционные методы закрепления грунта при соответствующем технико-экономическом обосновании, являются эффективными, позволяющими решать различные геотехнические задачи.

Сравнение свойств грунтобетона, получаемого путем инъекционной пропитки и методом механического смешивания, показало их значительное различие и отсутствие какой-либо корреляционной зависимости. В этой связи, при подборе составов инъекционных смесей на основе ОТДВ необходимо исследовать образцы грунтобетонных массивов, сформированных в режиме пропитки, моделирующим производственные условия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Svetlana Kasatkina. Russian City as a Philosophical Category of Urban Studies // *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 214, 5 December 2015, Pages 628-634. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.11.769.
2. A. Baklanov, C. S. B. Grimmond, D. Carlson, D. Terblanche, A. Hovsepyan From urban meteorology, climate and environment research to integrated city services// *Urban Climate*, Volume 23, March 2018, Pages 330-341. DOI: 10.1016/j.uclim.2017.05.004.
3. Ka-hung Yu, Eddie Chi-man Hui. Housing construction and uncertainties in a high-rise city. *Habitat International*, Volume 78, August 2018, Pages 51-67. DOI: 10.1016/j.habitatint.2018.05.011.
4. Ekaterina Nezhnikova. The Use of Underground City Space for the Construction of Civil Residential Buildings // *Procedia Engineering*, Volume 165, 2016, Pages 1300-1304. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.854.
5. Харченко И.Я., Алексеев В.А., Исрафилов К.А., Бетербиев А.С.Э. Современные технологии цементационного закрепления грунтов//*Вестник МГСУ*. 2017. № 5 (104). С. 552-558. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.552-558.
6. Харченко А.И., Харченко И.Я., Панченко А.И., Газданов Д.В. технология выравнивания здания Загорской ГАЭС-2 методом компенсационного нагнетания // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 4 (115). С. 490-498. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.490-498.
7. Mahdi Heidari, Fulvio Tonon. Ground reaction curve for tunnels with jet grouting umbrellas considering jet grouting hardening // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 76, June 2015, Pages 200-208. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.03.021.
8. O. A. Makovetskiy. Application of “Jet Grouting” for Installation of Substructures of Estates // *Procedia Engineering*, Volume 150, 2016, Pages 2228-2231. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.269.
9. G. G. Kashevarova, O. A. Makovetskiy. Analysis of Experimental and Estimated Jet-grouted Soil Mass Deformations // *Procedia Engineering*, Volume 150, 2016, Pages 2223-2227. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.268.
10. Fatiha Bouchelaghem. Multi-scale modelling of the permeability evolution of fine sands during cement suspension grouting with filtration// *Computers and Geotechnics*, Volume 36, Issue 6, July 2009, Pages 1058-1071. DOI: 10.1016/j.compgeo.2009.03.016.
11. Kwang Ho Sho, Sang Joon Park, Yong Jic Kim, Gun Cheol Lee, Kyoung Min Kim. Utilization of separator bag filter dust for high early strength cement production// *Construction and Building Materials*, Volume 25, Issue 5, May 2011, Pages 2318-2322. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.027.
12. M. Axelsson, G. Gustafson. The PenetraCone, a new robust field measurement device for determining the penetrability of cementitious grouts// *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 25, Issue 1, January 2010, Pages 1-8. DOI: 10.1016/j.tust.2009.06.004.
13. F. Bouchelaghem, A. Benhamida, H. Dumontet. Mechanical damage behaviour of an injected sand by periodic homogenization method// *Computational Materials Science*, Volume 38, Issue 3, January 2007, Pages 473-481. DOI: 10.1016/j.commatsci.2005.12.044.
14. Michael Galetakis, Christina Piperidi, Anthoula Vasiliou, George Alevizos. Experimental investigation of the utilization of quarry dust for the production of microcement-based building elements by self-flowing molding casting// *Construction and Building Materials*, Volume 107, 15 March 2016, Pages 247-254. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.014.
15. Гришин А.Н., Панченко А.И., Харченко И.Я., Баженов М.И. Тонкодисперсное композиционное вяжущее для закрепления грунтов инъекционным способом // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. № 11 (110). С. 1289-1298. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.11.1289-1298.

REFERENCES

1. Kasatkina, S.: Russian City as a Philosophical Category of Urban Studies. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, vol. 214, pp. 628-634 (2015). DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.11.769
2. Baklanov, A., Grimmond, C. S. B.: From urban meteorology, climate and environment research to integrated city services. *Urban Climate*, vol. 23, pp. 330-341 (2018). DOI: 10.1016/j.uclim.2017.05.004
3. Yu, K., Hui, E.Ch.: Housing construction and uncertainties in a high-rise city. *Habitat International*, vol. 78, pp. 51-67 (2018). DOI: 10.1016/j.habitatint.2018.05.011
4. Nezhnikova, E.: The Use of Underground City Space for the Construction of Civil Residential Buildings. *Procedia Engineering*, vol. 165, pp. 1300-1304 (2016). DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.854
5. Kharchenko, I.Ya., Alekseev, V.A. et al: Modern technologies of cementation consolidation of soils. *Vestnik MGSU*, No. 5 (104), pp. 552-558 (2017). DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.552-558
6. Kharchenko, A.I., Kharchenko, I.Ya. et al: Technology of leveling the building of Zagorskaya PSHPP-2 by the method of compensatory injection. *Vestnik MGSU*, No. 4 (115), vol. 13, pp. 490-498 (2018). DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.490-498
7. Heidari, M., Tonon, F.: Ground reaction curve for tunnels with jet grouting umbrellas considering jet grouting hardening. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 76, pp. 200-208 (2015). DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2015.03.021
8. Makovetskiy, O.A.: Application of “Jet Grouting” for Installation of Substructures of Estates. *Procedia Engineering*, vol. 150, pp. 2228-2231 (2016). DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.269
9. Kashevarova, G.G., Makovetskiy, O.A.; Analysis of Experimental and Estimated Jet-grouted Soil Mass Deformations. *Procedia Engineering*, vol. 150, pp. 2223-2227 (2016). DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.268
10. Bouchelaghem, F.: Multi-scale modelling of the permeability evolution of fine sands during cement suspension grouting with filtration. *Computers and Geotechnics*, vol. 36, issue 6, pp. 1058-1071 (2009). DOI: 10.1016/j.compgeo.2009.03.016
11. Sho, K.H., Park, S.J. et al.: Utilization of separator bag filter dust for high early strength cement production. *Construction and Building Materials*, vol. 25, issue 5, pp. 2318-2322 (2011). DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.027
12. Axelsson, M., Gustafson, G.: The PenetraCone, a new robust field measurement device for determining the penetrability of cementitious grouts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 25, issue 1, pp. 1-8 (2010). DOI: 10.1016/j.tust.2009.06.004
13. Bouchelaghem, F., Benhamida, A. et al.: Mechanical damage behaviour of an injected sand by periodic homogenization method. *Computational Materials Science*, vol. 38, issue 3, pp. 473-481 (2007). DOI: 10.1016/j.commatsci.2005.12.044
14. Galetakis, M., Piperidi, Ch. Et al.: Experimental investigation of the utilization of quarry dust for the production of microcement-based building elements by self-flowing molding casting. *Construction and Building Materials*, vol. 107, pp. 247-254 (2016). DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.014
15. Grishin, A.N., Panchenko, A.I. et al: Finely dispersed composite binder for hardening soils by injection method. *Vestnik MGSU*, No. 11 (110), vol. 12, pp. 1289-1298 (2017). DOI: 10.22227/1997-0935.2017.11.1289-1298

Информация об авторах

Баженова Софья Ильдаровна

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
канд. техн. наук, доц., доцент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов (ТВВиБ),
E-mail: BazhenovaSI@mgsu.ru

Алексеев Вячеслав Александрович

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
Заведующий лабораторией кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов (ТВВиБ),
E-mail: 634586@mail.ru

Information about authors

Bazhenova Sofya I.

National Research Moscow State University of Civil Engineering - Design Institute (NRU MGSU), Moscow, Russia
candidate in tech. sc., docent, associated prof. of the dep. of Technology of binders and concretes
E-mail: BazhenovaSI@mgsu.ru

Alekseev Vyacheslav A.

National Research Moscow State University of Civil Engineering - Design Institute (NRU MGSU), Moscow, Russia
Head of the laboratory of the dep. of Technology of binders and concretes
E-mail: 634586@mail.ru

С. В. КАЗНАЧЕЕВ¹

¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва,
г. Саранск, Россия

КОМПОЗИТЫ КОНТАКТНО-КОНДЕНСАЦИОННОГО ТВЕРЖДЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

***Аннотация.** Проблема утилизации промышленных отходов с каждым годом становится все более острой. Экологическая ситуация в нашей стране и во всем мире неуклонно ухудшается. Природные ресурсы, используемые человеком, так же сокращаются, что так же обуславливает необходимость их замены на альтернативные источники. В связи с этим все более актуальной является проблема получения эффективных композиционных строительных материалов и изделий, с применением отходов производства. Перспективным направлением решения данной проблемы является применение технологии контактно-конденсационное твердения. В статье приведены результаты исследования прочностных свойств композитов, изготовленных с применением пыли цементного производства, боя стекла и шлака. Приводятся результаты исследования физико-механических свойств и стойкости в условиях воздействия агрессивных сред. Исследованы различные способы совмещения компонентов данных композитов. В результате получены материалы на основе промышленных отходов, обладающие улучшенными прочностными характеристиками, стойкие к воздействию различных агрессивных сред.*

***Ключевые слова:** строительные материалы, экологические проблемы, промышленные отходы, вторичные ресурсы, технология контактно-конденсационного твердения.*

S. V. KAZNACHEEV¹

¹National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

CONTACT-CONDENSING HARDENING COMPOSITES WITH THE USE OF INDUSTRIAL WASTE

***Abstract.** The problem of industrial waste disposal is becoming more acute every year. The environmental situation in our country and around the world is steadily deteriorating. Natural resources used by humans are also declining, which also necessitates their replacement with alternative sources. In this regard, the problem of obtaining effective composite construction materials and products using industrial wastes is becoming increasingly urgent. A promising direction of solving this problem is application of contact-condensing hardening technology. The article presents the results of the study of strength properties of composites made using cement dust, glass and slag. The results of the study of physical and mechanical properties and resistance under the conditions of aggressive media are given. Various ways of combining components of these composites have been investigated. As a result, industrial waste materials having improved strength characteristics, resistant to various aggressive media are obtained.*

***Keywords:** construction materials, ecological problems, industrial waste, secondary resources, technology contact condensation*

Введение

В последнее время перед человечеством возникает большое количество новых вызовов, связанных с индустриализацией общества и ростом производства и потребления различной продукции. Экологическая ситуация в нашей стране и во всем мире неуклонно ухудшается. В связи с этим решение к решению экологической проблемы необходимо подключение специалистов в различных областях знания. Так вопрос утилизации промышленных отходов с каждым годом становится все более острой. Кроме того, возникает проблема ресурсосбережения и экономии природных ресурсов, количество которых сокращается, что обуславливает

необходимость их замены на альтернативные источники, какими могут являться отходы промышленного производства.

Проблема комплексного использования вторичного сырья, в том числе отходов тепловой энергетики, цементной, металлургической и стекольной промышленности в настоящее время является весьма актуальной. Данный вопрос неоднократно озвучивался, в том числе в «Стратегии развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года». Несомненно, что применение вторичных ресурсов является одним из важнейших направлений ресурсосбережения в современном строительстве [1–5]. Это связано с необходимостью охраны окружающей среды, дефицитностью отдельных сырьевых материалов, необходимостью повышения эффективности производства. Среди всего многообразия техногенных отходов можно выделить такие ресурсы как пыль цементного производства, бой стекла и шлак. Они являются эффективными вторичными ресурсами, которые могут быть использованы в строительной индустрии при получении связующих, бетонов и конструкций на их основе [1, 2].

Перспективным направлением получения эффективных композиционных строительных материалов и изделий, в том числе на основе промышленных отходов, является использование технологий, основанных на принципах контактно-конденсационного твердения [6, 7]. Использование принципов контактно-конденсационного твердения позволило предложить низкоэнергоемкую технологию получения широкой номенклатуры строительных материалов [6–9]. Данная технология позволяет получать композиционные материалы требуемой для строительных целей прочности, без значительных энергетических и трудовых затрат. При этом технологические приемы не отличаются сложностью и зачастую не требуют серьезного изменения производственных линий. Кроме того, ее применение способствует значительному сокращению технологического цикла и получению композиционных материалов с высокой «мгновенной» прочностью. Это обусловлено тем, что в момент приложения высокого внешнего давления в изделиях создаются стесненные условия, и процессы структурообразования протекают качественно по-другому и завершаются не за несколько часов, а за цикл прессования. Благодаря применению принципов контактно-конденсационного твердения многими авторами были проведены исследования, позволившие осуществить ряд разработок в различных областях строительного материаловедения, доказывающих несомненную практическую ценность предложенной технологии [10–17].

Часть исследований была проведена и с использованием вторичных сырьевых ресурсов, что доказало эффективность получения композитов контактно-конденсационного твердения с применением промышленных отходов [18–25]. Однако работа в данной области требует более полных исследований свойств и долговечности материалов, оптимизации составов и технологии изготовления данных композитов.

Экспериментальная часть

Сырьевые материалы. В проведенных исследованиях были использованы образцы пыли вращающихся печей, уловленных электрофильтрами трех цементных печей: №5, №7, №8 АО «Мордовцемент» (Республика Мордовия, пос. Комсомольский). Все перечисленные печи работают по мокрому способу производства клинкера. Отбор проб проводили из шнекового транспортера, который расположен в нижней части электрофильтра. Он предназначен для транспортировки уловленной пыли пневмовинтовому насосу. Пробы отбирались несколько раз с интервалом около часа. В заводской лаборатории были определены химические составы усредненных проб пыли-уноса (табл. 1).

Таблица 1 – Усредненный химический состав пыли цементного производства

Оксид	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	п.п.п
Содержание, %	42,46	11,37	2,41	2,08	0,60	3,90	0,49	6,9	29,43

По итогам проведенных исследований химического состава первоначальной и декарбонизированной цементной пыли сделать следующие выводы: Пыль из печей первоначального состояния представляет собой продукт с большим содержанием карбоната кальция (CaCO_3) - кальцита (около 38-47 % по массе), который служит источником карбонатных ионов при образовании спуррита и тиллеита, а также щелочных солей ($\text{K}_2(\text{CaCO}_3)_2$, $\text{Na}_2(\text{CaCO}_3)_2$). В составе декарбонизированных при температуре 1000 °С проб цементной пыли не отмечается наличие тиллеита, но сохраняется спуррит.

Тонкоизмельченный бой стекла – отход производства Саранского электролампового завода. Плотность в сухом состоянии 860–870 кг/м³. Удельная поверхность 3000–3500 см²/г. Химический состав боя стекла приведен в табл. 2.

Таблица 2 – Химический состав боя стекла

Оксид	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	BaO	MgO	Fe ₂ SO ₃	Al ₂ O ₃
Содержание, %	68,5–72,9	11,9–16,7	1,2–3,8	5,0–6,0	2,2–5,5	3,2–3,8	0,1–0,12	1,0–1,5

Тонкоизмельченный шлак – отход производства Саранского литейного завода ОАО «Центролит». Данные шлаки являются гранулированными и в соответствии с ГОСТ 5578-2019 классифицируются как кислые (см. табл. 3).

Таблица 3 – Химический состав шлака

Оксид	SiO ₂	CaO	MgO	MnO	FeO	Al ₂ O ₃	SO ₃
Содержание, %	42-49	22-28	2-6	3-6	2-6	10-12	0,3-0,7

Модели и методы

В ходе проведения экспериментов было изготовлено несколько партий образцов по технологии контактно-конденсационного твердения при давлении прессования от 10 до 200 МПа, а также контрольные составы по технологии виброуплотнения. Образцы, изготовленные по технологии контактно-конденсационного твердения, получались двустороннем прессованием в течении 10 с. Объектом исследования в данной работе были составы, подвергнутые термовлажностной обработке и отверждённые в нормальных условиях в течение 28 суток. После укладки образцы, подвергаемые термовлажностной обработке, в течение 1 сут твердели при нормальных условиях, а затем в условиях термовлажностной обработки по режиму 1,5+6+2 ч с температурой изотермического цикла 90 °С. Было произведено исследование свойств композитов на основе пыли цементного производства, наполненных боем стекла и шлаком, а так же бинарным наполнителем (стеклобой и шлак в соотношении 1 : 1).

При подборе составов многокомпонентных систем и разработке технологии их приготовления использовали методы математического планирования эксперимента. Варьируемые факторы выбирались с учетом критерия оптимизации. Для установления пределов варьирования были использованы предварительные эксперименты, что позволило проводить опыты в максимальной близости к области оптимума. При проведении эксперимента, представленного в этой работе, использовался двухфакторный план Коно с количеством опытов, равным 9.

Результаты исследования и их анализ.

По описанной выше методике нами были изготовленные композиты на основе пыли цементного производства наполненные боем стекла и шлаком (рис. 1). Как было сказано ранее в момент приложения высокого внешнего давления в образцах создаются стесненные условия, и процессы структурообразования протекают качественно по-другому. В процессе прессования было зафиксировано отжатие части поверхностной воды, которая регулирует количество межслоевой воды. По-видимому, в данный момент происходят процессы, обусловленные фазовыми превращениями и перестройкой пористой структуры.

Проведенные исследования свидетельствуют о значительном увеличении прочности композитов в результате приложения внешнего механического давления. Так в зависимости от вида и процентного содержания наполнителя, а также способа отверждения, прочность на сжатие композитов контактно-конденсационного твердения, изготовленных при давлении 200

МПа до 5 раз выше, чем у композитов аналогичного состава, полученных по стандартным технологиям. При этом было подтверждено значительное сокращение технологического цикла.

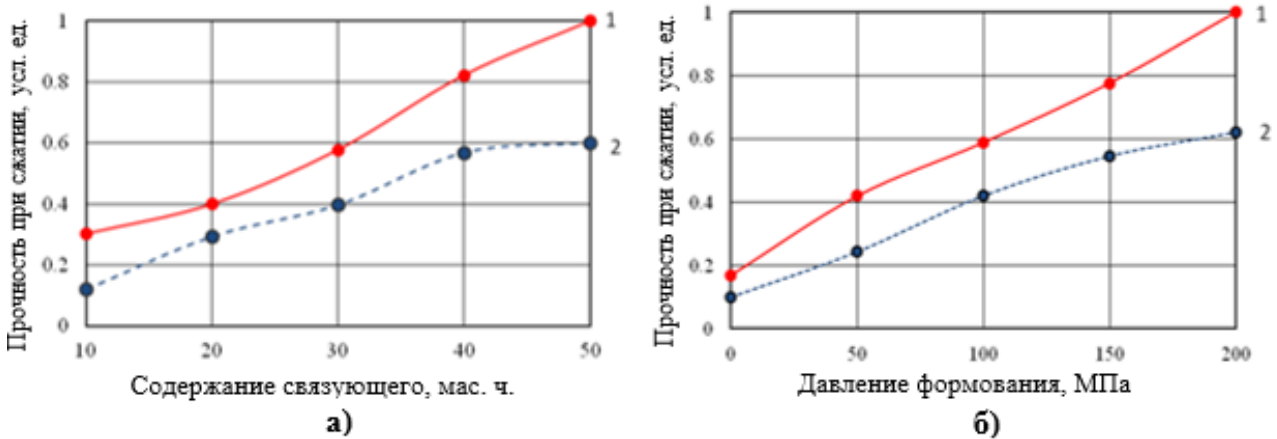


Рисунок 1 – Зависимость изменения прочности при сжатии композитов на основе цементной пыли, наполненных боем стекла: а) от содержания связующего, б) от давления формования
 1 – композиты, отвержденные в условиях термовлажностной обработки;
 2 – композиты, отвержденные в нормальных тепло-влажностных условиях

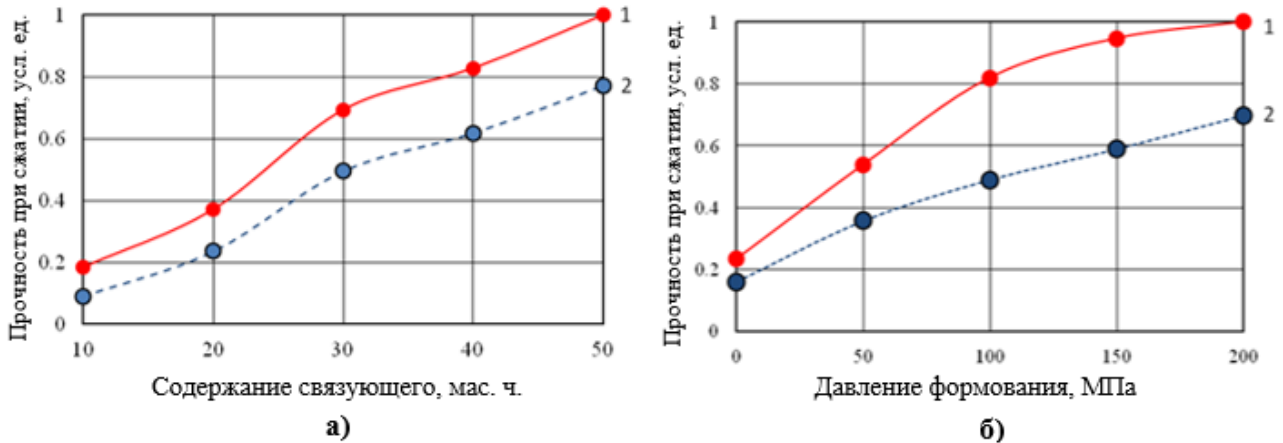


Рисунок 2 – Зависимость изменения прочности при сжатии композитов на основе цементной пыли, наполненных шлаком: а) от содержания связующего, б) от давления формования
 1 – композиты, отвержденные в условиях термовлажностной обработки;
 2 – композиты, отвержденные в нормальных тепло-влажностных условиях

Несколько отличающийся характер изменения прочности и пористости наполненных композитов, по-видимому, объясняется различной сжимаемостью порошков. Так, например кривая зависимости роста прочности от давления формования композитов, наполненных боем стекла, носит более монотонный характер по сравнению с композитами, наполненными шлаком.

Кроме того, вид и количество используемых компонентов оказывает значительное влияние и на оптимальный режим отверждения. В зависимости от содержания связующего и давления прессования превышение прочности композитов, отвержденных в режиме термовлажностной обработки, может достигать 40 % по сравнению с аналогичными составами, твердевшими в нормальных условиях. По-видимому, термовлажностная обработка активизирует щелочные оксиды, входящие в состав стекла, уровень pH среды увеличивается и процессы структурообразования протекают более интенсивно

Было отмечено что изменение прочности и пористости имеют прямую взаимосвязь: с уменьшением пористости прочность растет. При этом наиболее интенсивно рост прочности происходит при давлении прессования до 50 МПа, при дальнейшем его увеличении тенденция

изменения сохраняется, но носит менее ярко выраженный характер. Это свидетельствует о том, что повышение давления формования свыше 50 МПа менее эффективно и с экономической, и с технологической точек зрения.

Правильный выбор способа помола и последующего совмещения используемых компонентов является одной из важнейших технологических особенностей получения строительных композитов с высокими эксплуатационными свойствами. Для установления наиболее предпочтительных режимов мы вводили в бой стекла (или) шлак в состав образцов путем совместного помола или раздельным помолом композитов с их последующим совмещением. Исследования проведены с применением методов математического планирования эксперимента. В качестве матрицы планирования использовали план Коно, состоящий из 9 опытов. Варьируемыми факторами служили: X_1 – содержание наполнителя; X_2 – давление формования. Было установлено, что оптимальные режимы совмещения компонентов зависят от вида наполнителя и его количества. В качестве примера рассмотрим изготовление малонаполненных композитов (до 30 % наполнителя на 100 мас. ч связующего) на основе бинарного наполнителя (шлак + стеклобой). Максимальная прочность образцов, изготовленных с применением технологии совместного помола, наблюдается при содержании наполнителя в количестве 20–30 % от массы связующего. При применении технологии раздельного помола компонентов с последующим их совмещением максимальная прочность образцов наблюдается при содержании наполнителя в количестве 10 и 30 мас. ч. на 100 мас. ч. связующего. Максимальная прочность зафиксирована при 30 мас. ч. наполнителя и давлении формования 200 МПа (рис. 3).

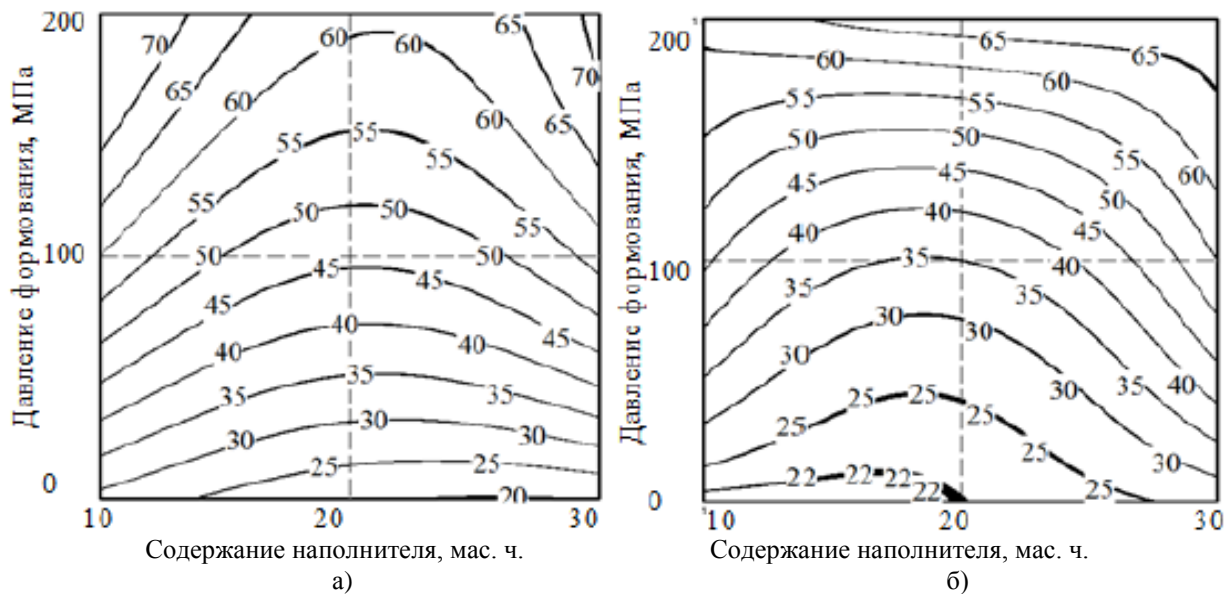


Рисунок 3 – Зависимость изменения прочности цементных композитов, наполненных бинарным наполнителем, полученных: а) путем раздельного помола компонентов с их последующим совмещением, б) совместного помола

На втором этапе исследования нами была исследована стойкость композитов контактно-конденсационного твердения к воздействию различных агрессивных сред и проведено сравнение с показателями традиционных композитов.

Известно, что стойкость бетонов в условиях воздействия большинства агрессивных сред во многом определяется пористостью материала, при увеличении которой повышается его проницаемость и в результате процессы деструкции идут более интенсивно, снижается прочность композитов и т.д. В связи с тем, что композиты обладают повышенной плотной упаковкой частиц, было высказано предположение о их повышенной устойчивости к воздействию различных агрессивных сред.

Одной из важнейших характеристик строительных композитов является их водостойкость, т.к. вода обладает высокой проникающей способностью и оказывает деструктивное воздействие практически на все виды композитов. Результаты испытания составов на основе цементной пыли, боя стекла и шлака, показали, что вид наполнителя, так и способ отверждения связующих оказывают значительное влияние на их стойкость.

У композитов контактно-конденсационного твердения, полученных на основе цементной пыли и выдержанных в воде с течением времени прочность возрастает. Однако, не смотря на общую тенденцию в изменении коэффициента водостойкости композитов, видно, что кривые носят несколько различающийся характер в зависимости от способа изготовления и вида наполнителя. Использование в качестве наполнителя боя стекла приводит к значительному повышению коэффициента водостойкости (до 25 % по сравнению с контрольными бездобавочными составами). У составов, отвержденных условиях термовлажностной обработки коэффициент стойкости на 10–15 % выше, чем у составов, отвержденных в естественных условиях (рис. 4 а).

Далее были проведены исследования, направленные на изучение химической стойкости композитов контактно-конденсационного твердения. Деградация под воздействием щелочи оценивалась по изменению массосодержания и коэффициенту стойкости, определяемому как относительное изменение предела прочности при сжатии после выдерживания в щелочном растворе. Была определена стойкости исследуемых композитов к воздействию щелочи. Как видно из графиков, у композитов, выдержанных в 5% растворе NaOH, с течением времени прочность снижается (рис. 4 б). Наивысшим показателем коэффициента стойкости характеризуются композиты контактно-конденсационного твердения, наполненные боем стекла и подверженные термовлажностной обработке (так после 90 суток выдерживания данный показатель составил 0,78). Композиты с аналогичными составами, изготовленные по технологии виброуплотнения обладают меньшим коэффициентом химической стойкости, величина которого за эти же сроки составляет 0,64.

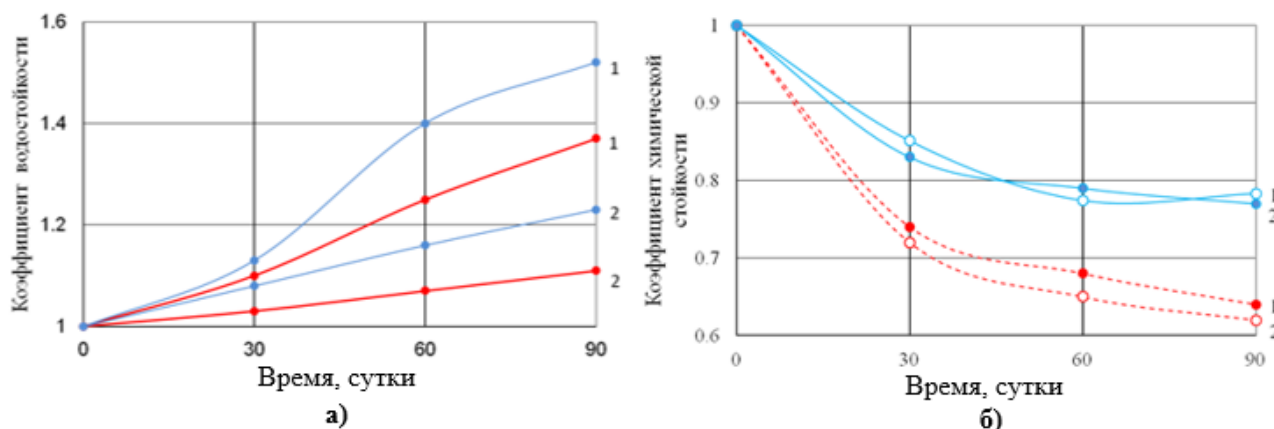


Рисунок 4 – Стойкость композитов на основе цементной пыли, наполненных боем стекла от способа изготовления и длительности испытания к воздействию: а) воды; б) щелочи
 — составы, изготовленные по технологии вибропрессования;
 — составы, изготовленные по технологии контактно-конденсационного твердения;
 1 – наполненные композиты, 2 – контрольные бездобавочные составы

Возможность биологических повреждений бетонов различного вида на неорганических вяжущих (в том числе цементах и цементной пыли), как правило, обусловлена воздействием продуктов метаболизма микроорганизмов (бактерий или мицелиальных грибов). Основные процессы деструкции обусловлены действием кислот, выделяемых в процессе жизнедеятельности данных микроорганизмов. Перечень таких кислот весьма обширен: от сильных минеральных (серной и азотной) до органических, как многоатомных (гуминовых, пировиноградной), так и более простых по структуре (уксусная, молочная, винная, щавелевая, яблочная,

лимонная). Бактерии развиваются при наличии жидких сред и как правило, подобная деструкция бетона начинается при его погружении в жидкую агрессивную среду (коллекторы, конструкции подземных сооружений и т. д.).

В данной работе представлены результаты стойкости исследуемых композитов в смеси веществ, являющихся продуктами метаболизма микроскопических организмов. В качестве предполагаемых агентов химической коррозии, вызванной воздействием продуктов жизнедеятельности бактерий, нами были использованы серная кислота H_2SO_4 (с концентрацией 2%), азотная кислота HNO_3 (2%), аммиак NH_3 (2%) (рис. 5).

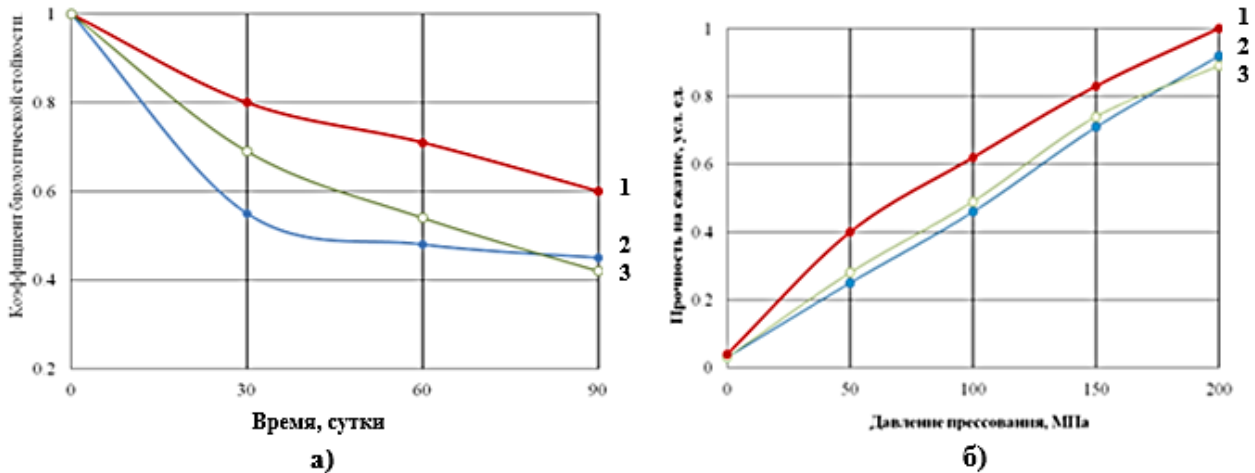


Рисунок 5 – Изменение коэффициента биологической стойкости композитов контактно-конденсационного твердения (а) и их прочности от давления прессования при воздействии модельной агрессивной среды в течение 90 суток (б)

1 – композиты наполненные стеклобоем, 2 – наполненные шлаком,
3 – контрольные составы композиты без наполнителя

На композиты, изготовленные с применением виброуплотнения, агрессивными средами было оказано сильное деструктивное воздействие, которое проявилось в быстром, значительном снижении прочности и разрушении образцов. У композитов, изготовленных по технологии контактно-конденсационного твердения и выдержанных в растворе веществ, являющихся продуктами метаболизма микроскопических организмов, с течением времени прочность тоже снижается (коэффициент биологической стойкости меньше 1), но деструктивное воздействие проявляется не столь существенно. Причем увеличение давления прессования позитивно влияет на изменение прочности и коэффициент биологической стойкости композитов контактно-конденсационного твердения, подвергнутых воздействию модельной химически агрессивной среды в течение 90 суток (см. рис. 4). Если сравнить эти значения с результатом испытания контрольных композитов, изготовленных без наполнителей, то видно, что применение боя стекла позитивно сказывается на стойкости композитов контактно-конденсационного твердения, выдержанных в растворе модельной химически агрессивной среды (коэффициент стойкости на 30 % выше, чем у ненаполненных образцов).

Таким образом, можно говорить о том, что композиционные материалы на основе цементной пыли, боя стекла и шлака, изготовленные по технологии контактно-конденсационного твердения, обладают большей стойкостью в различных агрессивных средах, чем композиты, изготовленные по стандартной технологии. Если учесть, что композиты контактно-конденсационного твердения обладают высокой прочностью, достигаемой доступными приемами без значительных затрат, то становится очевидным, что проведенные эксперименты подтверждают несомненную целесообразность применения этой технологии на практике.

Выводы

Была исследована возможность по внедрению промышленных отходов в производстве строительных материалов с применением технологии контактно-конденсационного твердения. Были изготовлены материалы на основе промышленных отходов Республики Мордовия: пыли цементного производства, боя стекла и шлака. Проведены исследования состава, технологии изготовления и отверждения на прочностные характеристики, структуру и химическую стойкость получаемых материалов.

Проведенные исследования свидетельствуют о значительном увеличении прочности и снижении пористости композитов в результате приложения внешнего механического давления. Были получены материалы с максимально плотной упаковкой частиц и прочностью до 5 раз выше, чем у композитов аналогичного состава, полученных по стандартным технологиям. При этом было подтверждено значительное сокращение технологического цикла и получены материалы с высокой «мгновенной» прочностью.

Вид и количественное соотношение используемых компонентов оказывает значительное влияние и на оптимальный режим отверждения. Для составов на основе боя стекла более предпочтительным является режим термовлажностной обработки. Кроме того, в зависимости от вида наполнителя и его количества можно подобрать оптимальные режимы совмещения компонентов.

Исследованные композиционные материалы контактно-конденсационного твердения на основе вторичных ресурсов, обладают большей стойкостью в различных химических и биологических агрессивных средах, чем композиты аналогичного состава, изготовленные по стандартной технологии.

Таким образом композиты контактно-конденсационного твердения, изготовленные на основе вторичных ресурсов обладают высокой прочностью, достигаемой доступными приемами без значительных затрат, а также повышенной химической и биологической стойкостью. Учитывая экономический эффект, достигаемый за счет использования альтернативного сырья, а также аспекты решения проблем экологии и ресурсосбережения, можно говорить о целесообразности применения этой технологии на практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дворкин Л. И., Пашков И. А. Строительные материалы из отходов промышленности. Киев: Высша шк. Головное изд-во, 1989. 208 с.
2. Абдрахимов В.З. Использование золошлакового материала и нанотехногенного карбонатного шлама в производстве кирпича на основе бейделлитовой глины // Строительство и реконструкция. 2019. №2 (82). С. 81-89.
3. Барахтенко В. В., Бурдонов А. Е., Зелинская Е. В. Оценка эффективности применения промышленных отходов в качестве наполнителя поливинилхлоридных композиций // Строительство и реконструкция. 2018. Vol. 80. № 6. С. 74-84.
4. Езерский В.А., Кузнецова Н.В., Бессонов И.В., Селезнев А.Д. Многокритериальный сравнительный анализ при оценке качества цементных композитов с использованием отходов ЦСП // Строительство и реконструкция. 2018. №3 (77). С. 89-97.
5. Плотников В. В. Повышение долговечности железобетонных конструкций путем модифицирования цементного бетона активированными кристаллогидратами на основе нефелинового шлама // Строительство и реконструкция. 2014. №3 (53). С. 46-53.
6. Глуховский В. Д., Рунова Р. Ф., Максун С. Е. Вяжущие и композиционные материалы контактного твердения. Киев : Выща школа, 1991. 242 с.
7. Глуховский В. Д., Рунова Р. Ф., Максун С. Е. Роль контактно-конденсационных процессов в синтезе прочности цементного камня // Цемент. 1989. № 10. С. 7-8.
8. Сидоренко Ю. В. Моделирование процессов контактно-конденсационного твердения низкоосновных гидросиликатов кальция : дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2003. 217 с.
9. Соломатов В. И., Коренькова С. Ф., Сидоренко Ю. В. Термодинамические аспекты контактной конденсации нестабильных силикатных систем // Известия вузов. Строительство. Новосибирск. 2001. № 2-3. С. 38-44.

10. Степанова М. П., Погамошневa Н. Д., Чернышов Е. М., Баженов Ю. М. Наноструктурные портландитоалюмосиликатные контактно-конденсационные системы твердения и композиты на их основе. Вестник МГСУ. 2013. № 2. С. 114-122.
11. Харченко Е. А., Глуховский И. В., Свидерский В. А. Исследование свойств минерального наполнителя на основе гидросиликатов кальция // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2014. № 4. С. 100-103.
12. Степанова М. П., Кращенко Т. А. Бесклинкерные портландито-алюмосиликатные композиты контактно-конденсационного твердения: развитие исследований // Высокие технологии в строительном комплексе. – 2018. № 2. С. 55-58.
13. Ерошкина Н. А., Коровкин М. О., Тымчук Е. И. Свойства контактно-конденсационных геопалимерных вяжущих на основе магматических горных пород // Современная техника и технологии. – 2014. – № 12 (40). – С. 14–17.
14. Овчаренко Г. И., Садрашева А. О., Викторов А. В. Контактно-конденсационные свойства гидратных фаз цементного камня // Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). 2017. Т. 20. № 2 (65). С. 141.149.
15. Tereshkin A. V., Kirichkova I. V., Kruglyak V. V. Technology of building composites on the basis of portlandite-aluminosilicate contact condensation systems of hardening // Key Engineering Materials. 2019. Vol. 802. P. 79-90.
16. Korenkova S. F., Sidorenko Yu. V. Nanotechnogenic raw materials for the production of the construction materials // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10. № 20. P. 40908-40913.
17. Sidorenko Y. V., Korenkova S. F. Self-organization processes in silicate and cement construction materials // Solid State Phenomena. 2016. Vol. 871. P. 47-52.
18. Ерофеев В. Т., Богатов А. Д., Казначеев С. В. Изучение процессов структурообразования и деструкции композитов контактно-конденсационного твердения на основе боя стекла // XXXV Огаревские чтения : материалы научной конференции. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2007. С. 219–224.
19. Ерофеев В. Т., Казначеев С. В., Богатов А. Д. Композиты контактно-конденсационного твердения на основе местных сырьевых материалов и отходов промышленности // Вестник Мордовского ун-та. 2008. № 4. С. 59-67.
20. Казначеев С. В. Долговечность композитов контактно-конденсационного твердения на основе отходов промышленности и местных материалов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2005. 19 с.
21. Джусупова М. А., Талантбек К. А. Оптимизация гранулометрического состава силикатных стеновых материалов с использованием техногенного сырья // Наука и инновационные технологии. 2017. № 3 (3). С. 107-110.
22. Гончарова М. А., Борков П. В., Аль-Суррайви Х.Г.Х. Рециклинг крупнотоннажных бетонных и железобетонных отходов при реализации контрактов полного жизненного цикла // Строительные материалы. 2019. № 12. С. 52-57.
23. Казначеев С. В., Губанов Д. А., Богатов А. Д., Ерофеев В. Т. Исследование биостойкости композитов контактно-конденсационного твердения // Биоповреждения и биокоррозия в строительстве : материалы Международной научно-технической конференции. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2004. С. 160-163.
24. Казначеев С. В. Прочностные свойства цементных композитов, наполненных техногенными отходами, при разной последовательности совмещения компонентов // Теоретические основы создания эффективных композитов : Сборник материалов Российской онлайн-конференции, посвященной Дню науки. Белгород. 2018. С. 134-143.
25. Казначеев С. В., Спирин В. А., Богатов А. Д., Ерофеев В. Т. Композиционные материалы контактно-конденсационного твердения на основе стеклобоя // Наука и инновации в Республике Мордовия : материалы IV Республиканской научно-практической конференции. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2005. С. 520-525.

REFERENCES

1. Dvorkin L. I., Pashkov I. A. Stroitel'nye materialy iz othodov promyshlennosti [Building materials from industrial wastes]. Kiev: Vyssha shk. Golovnoe izd-vo, 1989. 208 s.
2. Abdrakhimov V.Z. Ispol'zovanie zoloshlakovogo materiala i nanotekhnogenного karbonatного shlama v proizvodstve kirpicha na osnove bejdellitovoj gliny [Use of ash and slag material and nano-technological carbonate slurry in the production of bricks based on beidellite clay]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2019. Vol. 82. No 2. Pp. 81-89. (rus)
3. Barahtenko V. V., Burdonov A. E., Zelinskaya E. V. Ocenka effektivnosti primeneniya promyshlennyh othodov v kachestve napolnitelya polivinilhloridnyh kompozitsiy [Evaluation of efficiency of industrial waste application as a filler of polyvinyl chloride compositions]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2018. No 6 (80). Pp. 74-84. (ru3. s)
4. Ezerskiy V.A., Kuznecova N.V., Bessonov I.V., Seleznev A.D. Mnogokriterial'nyj sravnitel'nyj analiz pri ocenke kachestva cementnyh kompozitov s ispol'zovaniem othodov CSP [Ulti-criteria comparative analysis with the estimate of the quality of cement composites with the use of cbpb waste]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2018. Vol. 77. No 3. Pp. 89-97. (rus)
5. Plotnikov V. V. Povyshenie dolgovechnosti zhelezobetonnyh konstruktsiy putem modifizirovaniya cementnogo betona aktivirovannymi kristallogidratami na osnove nefelinovogo shlama [Increase durability of ferroconcrete construction materials by activation with crystalline hydrates on the basis of nepheline slag].

- tions by modification of cement concrete with activated crystallohydrates on the basis of nepheline sludge]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2014. Vol. 53. No 3. Pp. 46-53. (rus)
6. Gluhovskij V. D., Runova R. F., Maksunov S. E. Vyazhushchie i kompozicionnye materialy kontaktного tverdeniya [Binding and composite contact hardening materials]. Kiev : Vyshcha shkola, 1991. 242 p. (rus)
 7. Gluhovskij V. D., Runova R. F., Maksunov S. E. Rol' kontaktно-kondensacionnyh processov v sinteze prochnosti cementного kamnya [The role of contact condensation processes in the synthesis of cement stone strength] // *Cement*. 1989. No 10. Pp. 7-8. (rus)
 8. Sidorenko YU. V. Modelirovanie processov kontaktно-kondensacionного tverdeniya nizkoosnovnyh gidrosilikatov kal'ciya [Modeling of contact-condensation hardening processes of low-base calcium hydrosilicates] : dis. ... kand. tekhn. nauk. Samara, 2003. 217 p. (rus)
 9. Solomatov V. I., Koren'kova S. F., Sidorenko YU. V. Termodinamicheskie aspekty kontaktной kondensacii nestabil'nyh silikatnyh sistem [Thermodynamic aspects of contact condensation of unstable silicate systems] // *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. Novosibirsk. 2001. No 2-3. Pp. 38-44. (rus)
 10. Stepanova M. P., Potamoshneva N. D., Chernyshov E. M., Bazhenov YU. M. Nanostrukturnye portlanditoaluminosilikatnye kontaktно-kondensacionnye sistemy tverdeniya i kompozity na ih osnove [Nanostructured portlanditoaluminosilicate contact-condensation hardening systems and composites based on them] // *Vestnik MGSU*. 2013. No 2. Pp. 114-122. (rus)
 11. Harchenko E. A., Gluhovskij I. V., Sviderskij V. A. Issledovanie svojstv mineral'nogo napolnitelya na osnove gidrosilikatov kal'ciya [Study of properties of mineral filler based on calcium hydrosilicates] // *Resursoenergoeffektivnye tekhnologii v stroitel'nom komplekse regiona*. 2014. No 4. Pp. 100-103. (rus)
 12. Stepanova M. P., Krashchenko T. A. Besklinkernye portlandito-alyumosilikatnye kompozity kontaktно-kondensacionного tverdeniya: razvitie issledovaniy [Lineless portlandite-aluminosilicate contact-condensation hardening composites: research development] // *Vysokie tekhnologii v stroitel'nom komplekse*. – 2018. No 2. Pp. 55-58. (rus)
 13. Eroshkina N. A., Korovkin M. O., Tymchuk E. I. Svoystva kontaktно-kondensacionnyh geopolimernyh vyazhushchih na osnove magmaticheskikh gornyh porod [Properties of contact-condensation geopolymer binders based on magmatic rocks] // *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii*. – 2014. – No 12 (40). – Pp. 14-17. (rus)
 14. Ovcharenko G. I., Sadrashева A. O., Viktorov A. V. Kontaktно-kondensacionnye svojstva gidratnyh faz cementного kamnya [Contact-condensation properties of hydrate phases of cement stone] // *Trudy Novosibirskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta (Sibstrin)*. 2017. Vol. 20. No 2 (65). Pp. 141.149. (rus)
 15. Tereshkin A. V., Kirichkova I. V., Kruglyak V. V. Technology of building composites on the basis of portlandite-aluminosilicate contact condensation systems of hardening // *Key Engineering Materials*. 2019. Vol. 802. P. 79-90.
 16. Korenkova S. F., Sidorenko Yu. V. Nanotechnogenic raw materials for the production of the construction materials // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. Vol. 10. No 20. P. 40908-40913.
 17. Sidorenko Y. V., Korenkova S. F. Self-organization processes in silicate and cement construction materials // *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 871. P. 47-52.
 18. Erofeev V. T., Bogatov A. D., Kaznacheev S. V. Izuchenie processov strukturoobrazovaniya i destrukcii kompozitov kontaktно-kondensacionного tverdeniya na osnove boya stekla [Study of processes of structure formation and destruction of contact-condensation hardening composites based on glass breakage] // XXXV Ogarevskie chteniya : materialy nauchnoj konferencii [XXXV Ogarev Readings: Proceedings of the Scientific Conference]. Saransk : Izd-vo Mordov. un-ta, 2007. Pp. 219-224. (rus)
 19. Erofeev V. T., Kaznacheev S. V., Bogatov A. D. Kompozity kontaktно-kondensacionного tverdeniya na osnove mestnyh syr'evykh materialov i othodov promyshlennosti [Contact-condensation hardening composites based on local raw materials and industrial waste] // *Vestnik Mordovskogo un-ta*. 2008. No 4. Pp. 59-67. (rus)
 20. Kaznacheev S. V. Dolgovechnost' kompozitov kontaktно-kondensacionного tverdeniya na osnove othodov promyshlennosti i mestnyh materialov [Durability of contact-condensation hardening composites based on industrial wastes and local materials] : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Penza, 2005. 19 p. (rus)
 21. Dzhusupova M. A., Talantbek K. A. Optimizatsiya granulometricheskogo sostava silikatnyh stenovykh materialov s ispol'zovaniem tekhnogennogo syr'ya [Optimisation of the particle size distribution of silicate wall materials using technogenic raw materials] // *Nauka i innovacionnye tekhnologii*. 2017. No 3 (3). Pp. 107-110. (rus)
 22. Goncharova M. A., Borkov P. V., Al'-Surajvi H.G.H. Recikling krupnotonnazhnyh betonnyh i zhelezobetonnyh othodov pri realizacii kontraktov polnogo zhiznennogo cikla [Recycling of coarse concrete and reinforced concrete waste in full life cycle contracts] // *Stroitel'nye materialy*. 2019. No 12. Pp. 52-57. (rus)
 23. Kaznacheev S. V., Gubanov D. A., Bogatov A. D., Erofeev V. T. Issledovanie biostojkosti kompozitov kontaktно-kondensacionного tverdeniya [Study of bio-resistance of contact-condensation hardening composites] // *Biopovrezhdeniya i biokorroziya v stroitel'stve : materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Bio-damage and biocorrosion in construction: proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Saransk : Izd-vo Mordov. un-ta, 2004. Pp. 160-163. (rus)
 24. Kaznacheev S. V. Prochnostnye svojstva cementnyh kompozitov, napolnennyh tekhnogennymi othodami, pri raznoj posledovatel'nosti sovmeshcheniya komponentov [Strength properties of cement composites filled with man-made wastes with different sequence of components alignment] // *Teoreticheskie osnovy sozdaniya effektivnyh kompozitov : Sbornik*

materialov Rossijskoj onlajn-konferencii, posvyashchennoj Dnyu nauki [Theoretical Basis for Effective Composites: Collection of Materials of the Russian Online Conference Dedicated to Science Day]. Belgorod. 2018. Pp. 134-143. (rus)

25. Kaznacheev S. V., Spirin V. A., Bogatov A. D., Erofeev V. T. Kompozicionnye materialy kontaktno-kondensacionnogo tverdeniya na osnove stekloboya [Composite materials of contact-condensation hardening based on glass] // Nauka i innovacii v Respublike Mordoviya : materialy IV Respublikanskoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Science and innovation in the Republic of Mordovia: materials of the IV Republican Scientific and Practical Conference]. Saransk : Izd-vo Mordov. un-ta, 2005. Pp. 520-525. (rus)

Информация об авторах:

Казначеев Сергей Валерьевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия, канд. техн. наук, доц., доцент, доцент кафедры строительных материалов и технологий,
E-mail: kaznacheevsv@mail.ru

Information about authors:

Kaznacheev Sergej V.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia,
candidate in tech. sc., docent, associated prof. of the dep. of dep. of Construction materials and technology,
E-mail: kaznacheevsv@mail.ru

ТКАЧ Е.В.¹, БИЧАЕВ М.И.¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г.Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ГАЛЛУАЗИТОВЫХ НАНОТРУБОК НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ

Аннотация. Еще начиная со второй половины XX века во всем мире было предпринято не мало попыток по созданию полимерных композитов с повышенными эксплуатационными характеристиками путем их модификации такими добавками, как каучук, минеральный наполнитель, а также органические и неорганические частицы [2–3]. Для достижения повышенных эксплуатационных свойств композитов производители вводят в эпоксидные матрицы комбинации различных добавок-модификаторов, применение которых позволяет решить большинство проблем, связанных с эксплуатацией и долговечностью полимерных материалов. На данный момент из наиболее известных наполнителей эпоксидных систем самыми успешными являются углеродные нанотрубки (УНТ), которые по праву считаются идеальными добавками для полимеров из-за их высокой прочности и трубчатой структуры [18–20]. В данном исследовании проводилось изучение влияния галлуазитовых нанотрубок (ГНТ) на механические свойства отвержденных образцов на эпоксидной основе. Механические испытания проводились согласно методике national standard of the Russian Federation GOST R 56800-2015 «Polymer composites. Determination of mechanical tensile properties of unreinforced and reinforced materials» (ASTM D638-10 «Standard test method for tensile properties of plastics»). Были получены следующие результаты: предел прочности при одноосном растяжении был улучшен на +18,58%, модуль упругости - на +6.90%, относительное удлинение уменьшилось на -15,57% в образцах, содержащих 10% по масс. ГНТ. В данном исследовании галлуазитовые нанотрубки продемонстрировали свою эффективность в качестве наполнителя эпоксидной смолы, по сравнению с УНТ - частицы галлуазита являются более предпочтительным вариантом, по причине их существенной дешевизны.

Ключевые слова: галлуазит, эпоксидная смола, механические свойства.

ТКАЧ Е.В.¹, БИЧАЕВ М.И.¹¹National Research Moscow State Civil Engineering University, Moscow, Russia

INFLUENCE OF HALLOYSITE NANOTUBES ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES

Since the second half of the 20th century, many attempts have been made all over the world to create polymer composites with enhanced performance characteristics by modifying them with additives such as rubber, mineral filler, and also organic and inorganic particles [2–3]. To achieve enhanced performance properties of composites, manufacturers introduce combinations of various modifier additives into epoxy matrices, the use of which allows solving most of the problems associated with the operation and durability of polymeric materials. Currently, the most successful fillers of epoxy systems are the most successful carbon nanotubes (CNTs), which are rightly considered ideal additives for polymers because of their high strength and tubular structure [18–20]. In this study, we studied the effect of halloysite nanotubes (HNTs) on the mechanical properties of cured epoxy-based samples. Mechanical tests were carried out according to the methodology of national standard of the Russian Federation GOST R 56800-2015 “Polymer composites. Determination of mechanical tensile properties of unreinforced and reinforced materials” (ASTM D638-10 “Standard test method for tensile properties of plastics”). The following results were obtained: uniaxial tensile strength was improved by + 18.58%, elastic modulus - by + 6.90%, elongation decreased by -15.57% in samples containing 10 wt% halloysite. In this study, halloysite nanotubes have been shown to be effective as an epoxy filler compared to CNTs - halloysite particles are more preferred because of their low cost.

Keywords: halloysite, epoxy resin, composite, mechanical properties

Введение

По данным Отдела народонаселения ООН в 1950 году на планете было 2.5 миллиарда человек. Сейчас в 2020 году их насчитывается 7.7 миллиарда, а в 2050 году будет 9.8 миллиардов. К концу столетия ООН ожидает, что население мира составит 11.2 миллиарда человек [1].

Очевидно, что с ростом населения, будет происходить и рост в потреблении ресурсов, которых у планеты недостаточно, чтобы в нынешней парадигме обеспечить всех жителей Земли благами современной цивилизации. Единственным мирным и рациональным выходом из сложившейся ситуации может послужить разработка различных технологических решений, способных повысить производительность глобального производства.

В связи с этим возникает вопрос, а возможно ли реформировать материальную основу жизни человечества таким образом, чтобы, например, к 2050 году можно было обеспечивать 9.8 миллиардов человек по всей планете всеми необходимыми благами современной цивилизации, а к 2100 году? Ответ на этот вопрос – конечно да, однако для его разрешения необходимо уменьшить производство материалов и энергии в два раза, но для этого необходимо повысить свойства основных материалов примерно в 4 раза. Решение данной задачи возможно через создание суперкомпозитов. Если компоненты суперкомпозита идеально сопряжены, то свойство конечного продукта является средним между свойствами его компонентов пропорционально их массовой доле.

Одним из представляющих интерес направлений в современном материаловедении, считается физико-химическая модификация эпоксидных смол при помощи различных наполнителей. Эпоксидные смолы широко используются в различных областях техники благодаря его уникальным характеристикам: высокой адгезионной прочности, относительно высокой прочности, жесткости и твердости, а также превосходной химической и термостойкости. Однако большинство отвержденных эпоксидных систем имеют низкую вязкость разрушения (трещиностойкость) и низкую ударопрочность и повышенную склонность к расслоению.

Еще начиная со второй половины XX века во всем мире было предпринято не мало попыток по созданию полимерных композитов с повышенными эксплуатационными характеристиками путем их модификации такими добавками, как каучук, минеральный наполнитель, а также органические и неорганические частицы [2–3].

Для достижения повышенных эксплуатационных свойств композитов производители вводят в эпоксидные матрицы комбинации различных добавок-модификаторов, применение которых позволяет решить большинство проблем, связанных с эксплуатацией и долговечностью полимерных материалов. Однако известно, что введение различных наполнителей может приводить как к повышению, так и снижению механических свойств модифицированных полимерных материалов [4].

В последние годы было проведено достаточно много исследовательских работ, посвященных модификации полимеров с применением жестких наночастиц или нановолокон. Было обнаружено, что неорганические добавки, такие как кремнезем, глинозем и частицы стекла, являются перспективными модификаторами для повышения свойств эпоксидных смол [5–9]. Полученные эпоксидные нанокомпозиты, ожидаемо, имели повышенные механические характеристики относительно обычных полимерных композитов [8,10]. В частности, частицы из каучука со структурой ядро-оболочка являются превосходными материалами для упрочнения эпоксидных материалов [11–14].

С целью улучшения свойств эпоксидных смол в исследовании [15] изучались частицы монтмориллонита (ММТ) в качестве потенциального модификатора. Однако до сих пор не было обнаружено значительного положительного изменения механических свойств эпоксидных нанокомпозитов, модифицированных ММТ.

В исследовании [16] было обнаружено, что добавление вискеро-титаната калия (ВТК) позволяет улучшить износостойкость композитов. Эпоксидная смола с наполнителем ВТК 15 по мас.% имеет самую низкую удельную скорость износа и самый высокий коэффициент тре-

ния по сравнению с другими испытательными образцами. ВТК оказали положительное влияние на плотность, твердость и жесткость композитов. Однако, с увеличением содержания ВТК прочностные свойства эпоксидных образцов снижаются.

В работе [17] изучалось совместное влияние наночастиц каучука (100 нм) с SiO₂ (16 нм) на механические свойства отвержденной эпоксидной смолы. Было обнаружено, что при достижении оптимального содержания частиц каучука значительно повышаются ударная вязкость и относительное удлинение отвержденных полимеров, в то время как добавление частиц нано-SiO₂ ведет к повышению прочности и модуля упругости эпоксидной смолы. При добавлении 2 % по масс. наночастиц SiO₂ в смесь эпоксидной смолы с частицами каучука 10 % по масс. («ядро оболочка») достигается самый лучший эффект: модуль упругости 3.5 ГПа и предел прочности при растяжении 89 МПа.

На данный момент из наиболее известных наполнителей эпоксидных систем самыми успешными являются углеродные нанотрубки (УНТ), которые по праву считаются идеальными добавками для полимеров из-за их высокой прочности и трубчатой структуры [18-20].

В комплексном исследовании [21] был разработан композитный материал путем объединения углеродной ткани и многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) в эпоксидной матрице. Различные концентрации МУНТ гомогенизировали в эпоксидной смоле и наносили на углеродную ткань с последующим отверждением. Испытания на растяжение и изгиб проводились с целью изучения влияния МУНТ на механические свойства композитного материала (КМ). В результате, было установлено, что добавление в эпоксидную матрицу 0.25% по масс. многостенных УНТ привело к росту прочности на растяжение и изгиб на 46 и 32%, соответственно. Это улучшение было связано с эффектом преодоления микротрещин у УНТ, которые действовали как нано-швы, сохраняя целостность полимерной матрицы, тем самым повышая прочностные характеристики отвержденных композитов.

Однако у УНТ есть существенный недостаток – это его стоимость и сложность в синтезе. В частности, графеновые нанотрубки (одностенные углеродные нанотрубки), производимые компанией OCSIAL (Российская Федерация), стоят 870 долл. США за 100 г наноматериала [22]. Мировое производство на уровне 15-20 тонн данных нанотрубок вполне достаточно для изготовления суперкомпозитов для массового потребления. Но на данный момент сдерживающим фактором для промышленного внедрения УНТ является очень высокая стоимость [23]. По этой причине разработка технологий производства полимерных материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками с УНТ на сегодняшний день является трудновыполнимой задачей.

На сегодняшний день, существует необходимость в поиске более доступного универсального в применении наполнителя – аналога УНТ со схожими физико-механическими показателями, но при этом дешевого, биосовместимого, не токсичного, способствующего к повышению механических свойств отвержденных полимеров.

Таким наполнителем может являться галлуазитовая глина, в основном состоящая из трубчатых частиц. Галлуазитовые нанотрубки – это двухслойный алюмосиликат природного происхождения со спиральной конформацией (рис. 1) и структурной формулой (Al₂Si₂O₅(OH)₄*nH₂O). Расстояние между слоями зависит от степени гидратации: при n=0 межслоевое расстояние составит 0.7 нм и 1 нм при n=2. Известно, что галлуазит обладает слоистой структурой: внутренняя – Al-OH и внешняя – Si-O-Si поверхности имеют положительный и отрицательный заряды соответственно [24].

Стоимость данного наноматериала, по мнению ученого Львова, существенно ниже УНТ и находится в диапазоне от 4-5 \$ США. [25].

В последние годы наноглина стала предметом особого интереса для многих ученых и исследователей в области химии, физики, техники и биологии из-за их превосходных свойств и стабильности [26-29]. Именно с них началась разработка новых «умных» материалов: галлуазитовые нанотрубки применялись в качестве контейнера с контролируемым десорбцией различных веществ [30-32].

Создание полимерного композита с повышенными эксплуатационными характеристиками основано на уникальном строении алюмосиликатного наполнителя – это наличие на поверхности ГНТ покрова из гидроксильных групп [33-37], данный факт является условием возможного протекания химического взаимодействия между поверхностными ОН-группами алюмосиликата и полимером, итогом которого является образование прочных негидролизуемых связей [1].

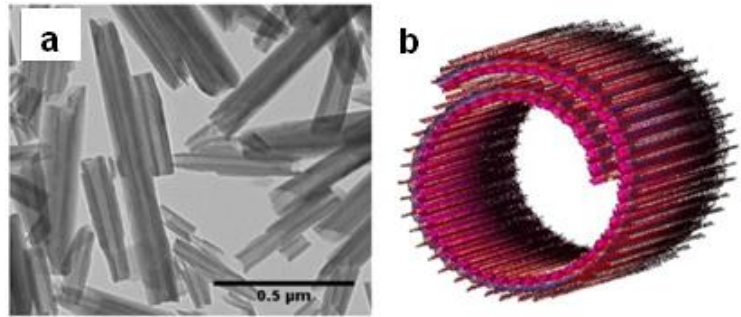


Рисунок 1 – Изображение ГНТ:
а) ТЭМ фото галлуазитовых трубок, б) модель спиральной конфигурации галлуазитовой трубки (б) [35]

Цель исследования – продемонстрировать возможность эффективного применения ГНТ в качестве наполнителя эпоксидных систем. Задачи, которые необходимо решить для достижения данной цели, состоят в проведении серии испытаний по определению механических характеристик наполненных образцов при их растяжении.

Модели и методы

Изготовление композитов осуществлялось путем смешивания полимерного состава АЭ-1 («Интер Аква», Москва, Российская Федерация, см. таблицу 1) с нанотрубками галлуазита (Imerys Ceramics, New Zealand – Kerikeri, см. таблицу 2) в количестве 5%, 10% по массе от эпоксидной смолы.

АЭ-1 представляет собой двухкомпонентный эпоксидный компаунд холодного отверждения, изготовленный на основе эпоксидно-диановых компонентов – растворимых, плавких и реакционноспособных олигомерных продуктов на базе эпихлоргидрина дифенилопропана (компонент «А» - эпоксидная смола) и модифицированного алифатического полиамина (компонент «Б» - отвердитель).

Таблица 1 – Технические характеристики эпоксидного состава АЭ-1, заявленные производителем

Внешний вид компонентов	Однородная тиксотропная система - паста	
Цвет материала	Компонент А – светло-жёлтый;	Компонент Б – темно-серый
Соотношение компонентов	100	50
Плотность эпоксидной системы А+Б при температуре (20±2)°С, г/см³, не более	1,65	
Время жизнеспособности при температуре (20±2)°С, мин, не менее	60	
Прочность сцепления (адгезия), МПа, не менее	2,7 (разрушение по бетону)	
Модуль упругости, ГПа	2,5-2,9	

Таблица 2 – Морфологические характеристики ГНТ

Месторождение	L, (нм)	D (нм)	d, (нм)	T, (нм)	Суд, (м2/г)	П, (см3/г)	R
Matauri Bay, New Zealand	100–3000	50–200	15–70	20–100	22.1	0.06	12,4

L – длина нанотрубки. D – внешний диаметр. d – внутренний диаметр. T – толщина стенки. Суд – удельная площадь поверхности. П – пористость. R – соотношение сторон, где $R = L_{cp} / D_{cp}$

Изготовления образцов производилось в следующем порядке: ГНТ были добавлены в емкость к компоненту А, где затем производилось перемешивание при 20 °С в течении 5 часов. После этого отвердитель (компонент Б) добавляли к гомогенной системе (ГНТ + «А») в

пропорции «А»:«Б»=100:50 по массе и перемешивали до получения однородной массы. Затем полученные смеси были залиты в формы для изготовления плоских образцов с последующим отверждением в нормальных условиях в течение суток. Для сравнения полученных механических характеристик также готовили контрольные образцы без алюмосиликатной добавки.

Спустя сутки отвержденные образцы были извлечены из силиконовых форм и направлены на фрезерный станок для получения образцов (рис. 2) соответствующих геометрических размеров, указанных в [39]. После обработки готовые образцы направлялись на универсальную машину Instron 150 LX, где осуществлялось их растяжение.

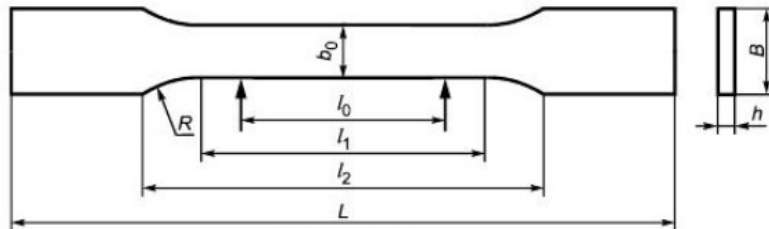


Рисунок 2 – Плоский образец для испытания на одноосное растяжение

Типоразмер образцов назначался исходя из предварительно известного или предполагаемого модуля упругости (в нашем случае эпоксидный состав, из которого были изготовлены плоские образцы в виде лопаток, имеет модуль упругости свыше 700 МПа), испытываемого материала и скорости нагружения мм/мин, указанных в таблице 4 [39].

Таким образом, нам известны следующие данные для проведения испытания плоских образцов на одноосное растяжение:

Скорость проведения испытания 1 мм/мин;

Вид образца: плоский с прямоугольным сечением;

Типоразмер образца: тип 5

Минимальная толщина: $h=4$ мм;

Геометрические размеры образца: $b_0=3,18$ мм; $l_1=9,53$ мм; $l_2=9,53$ мм; $L=63,5$ мм; $l_0=7,62$ мм; $l_2=25,4$ мм; $R=12,7$ мм; $R_1=25$ мм.

Площадь поперечного сечения: $S=12,72$ мм².

Механические исследования на растяжение производились на универсальной испытательной машине Instron 150 LX (см. рисунок 3, а) с применением соответствующих захватов: для одноосного растяжения (см. рисунок 3, б). Механические испытания проводились с целью определения модуля упругости, относительного удлинения после разрыва и предела прочности при разрыве по методике [39].

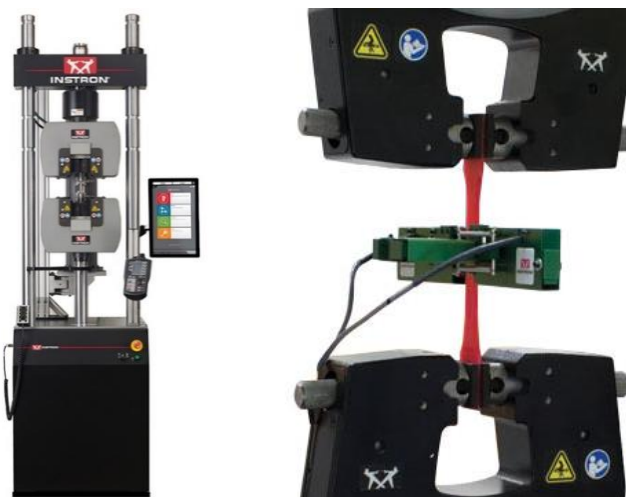
Результаты исследования и их анализ

По результатам исследования, было установлено, что в ненаполненных образцах разрушение начинается с дефекта на поверхности образца или внутри него, испытывая постоянную растущую деформацию вплоть до окончательного разрушения. Однако для эпоксидных смол, модифицированных галлуазитом, напряжения, при которых начинают расти трещины, выше из-за армирующего эффекта нанотрубок галлуазита, хотя трещины также возникают из-за дефектов, развивающихся на поверхности образца или внутри его. Также было обнаружено, что поверхности модифицированных образцов в зоне максимального растяжения более шершавые, чем у отвержденной чистой эпоксидной смолы, что показывает влияние частиц галлуазита.

В последние годы были опубликованы впечатляющие результаты по упрочнению эпоксидных смол такими наполнителями как углеродные нанотрубки или фибра, частицы монтмориллонита. Изменения механических свойств образцов в зависимости от выбранного наполнителя показано в таблице 3.

Анализируя результаты различных исследований, было обнаружено, что улучшения свойств для эпоксидных смол, модифицированных частицами галлуазита, не столь значительны, по сравнению с МУНТ [21], однако нанокompозиты на основе эпоксидной смолы, модифицированные необработанными частицами галлуазита, в настоящем исследовании демонстрируют эквивалентное улучшение по сравнению с образцами, модифицированными комплексным наполнителем, состоящим из nano-SiO_2 + частицы каучука со структурой ядро-оболочка [17].

Кривые зависимости деформации от приложенной нагрузки для образцов с различным содержанием ГНТ показаны на рис. 4. Очевидно, что композиты, содержащие частицы галлуазита, имеют повышенные прочность и модуль упругости по сравнению с не модифицированными образцами.



а) б)

Рисунок 3 – Оборудование для механических испытаний:
 а) универсальная испытательная машина Instron 150 LX,
 б) захваты образца-лопатки для одноосного растяжения с датчиком определения относительных поперечных и продольных деформаций

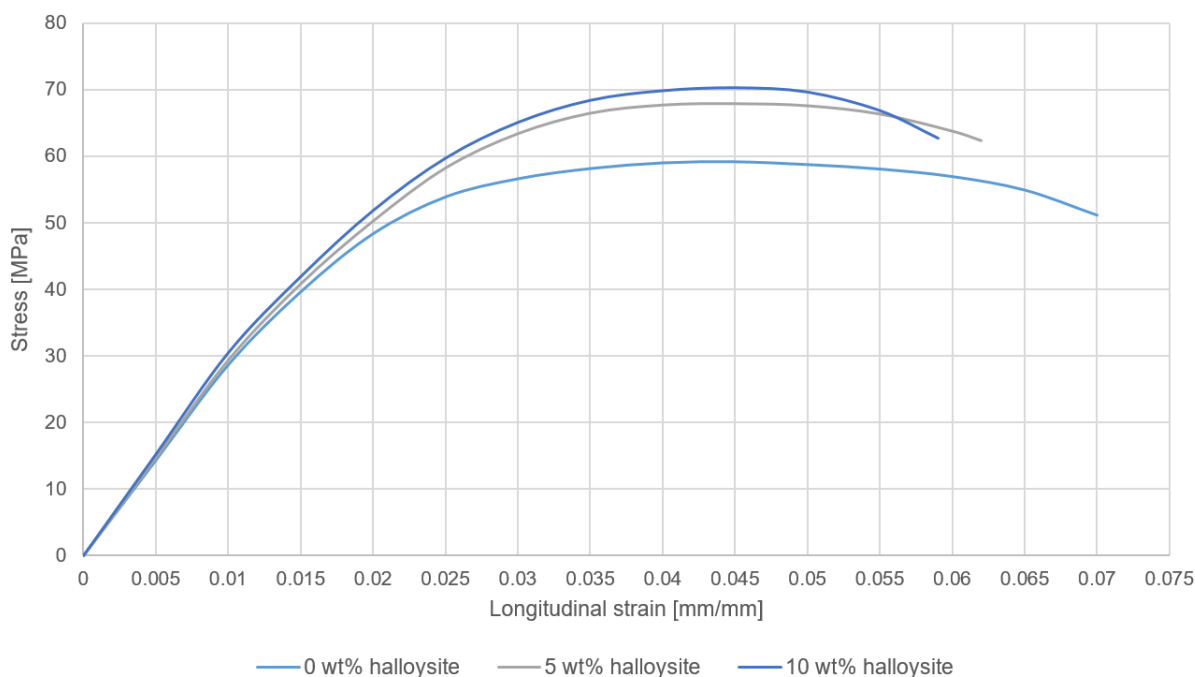


Рисунок 4 Кривые «напряжение-деформация» при испытании образцов эпоксиполимера на одноосное растяжение.

Таблица 3 Сравнение улучшений механических свойств для нанокompозитов на эпоксидной основе с различными наполнителями

Наименование наполнителя	Материалы образцов	Содержание наполнителя, %	Предел прочности на растяжение, МПа		Модуль упругости, ГПа		Относительное удлинение после разрыва, %	
			Факт. значение	Изменение, %	Факт. значение	Изменение, %	Факт. значение	Изменение, %
Вискеры титаната калия [16]	Вискеры титаната калия + эпоксидная смола	0	64	0.00	1.77	0.00	5.48	0.00
		5	57	-10.94	1.95	10.17	4.72	-13.87
		10	54	-15.63	2.29	29.38	4.11	-25.00
		15	51	-20.31	2.49	40.68	3.78	-31.02
Нано SiO ₂ с частицами каучука 10% по масс. [17]	Наночастицы каучука (ядро-оболочка) + нано-SiO ₂ + эпоксидная смола	0	82	0.00	3.10	0.00	5.5	0.00
		1	87	6.10	3.20	3.23	5.2	-5.45
		2	89	8.54	3.50	12.90	4.9	-10.91
		3	80	-2.44	3.60	16.13	4.5	-18.18
Многослойные углеродные нанотрубки [21]	Углеродная ткань + МУНТ + эпоксидная смола	0	415	0.00	51.90	0.00	-	-
		0.15	541	30.36	60.80	17.15	-	-
		0.25	606	46.02	65.10	25.43	-	-
		0.5	579	39.52	55.60	7.13	-	-
Однослойные углеродные нанотрубки [38]	ОУНТ + эпоксидная смола	0.75	530	27.71	52.10	0.39	-	-
		0	54	0.00	1.75	0.00	-	-
		0.05	28	-48.15	0.85	-51.43	-	-
		0.1	36	-33.33	1.15	-34.29	-	-
		0.2	41	-24.07	1.30	-25.71	-	-
		0.4	43	-20.37	1.40	-20.00	-	-
Многослойные углеродные нанотрубки [38]	МУНТ + эпоксидная смола	0.6	25	-53.70	0.80	-54.29	-	-
		1	20	-62.96	0.70	-60.00	-	-
		0	54	0.00	1.75	0.00	-	-
		0.05	30	-44.44	1.00	-42.86	-	-
		0.1	40	-25.93	1.30	-25.71	-	-
		0.2	44	-18.52	1.45	-17.14	-	-
Галлуазитовые нанотрубки (текущее исследование)	ГНТ + эпоксидная смола	0.4	47	-12.96	1.50	-14.29	-	-
		0.6	48	-11.11	1.55	-11.43	-	-
		1	55	1.85	1.76	0.57	-	-
		0	59.2	0.00	2.90	0.00	6.99	0.00
		5	67.9	14.70	2.92	0.69	6.19	-11.44
		10	70.2	18.58	3.10	6.90	5.91	-15.57

Выводы

Галлуазитовые нанотрубки в текущем исследовании использовались в качестве наполнителя эпоксидной смолы с целью создания композита с повышенными механическими свойствами. Прочностные показатели отвержденных образцов были определены экспериментально согласно методике [39].

Были сделаны следующие выводы:

1. Значения предела прочности при одноосном растяжении (σ_b) полимерных композитов для отвержденных образцов следующие: с 0% по масс. ГНТ – 59.2 МПа; с 5% по масс. ГНТ – 67.9 МПа; с 10% по масс. ГНТ – 70.2 МПа.

2. Значения модуля упругости полимерных композитов для отвержденных образцов следующие: с 0% по масс. ГНТ – 2.90 ГПа; с 5% по масс. ГНТ – 2.92 ГПа; с 10% по масс. ГНТ – 3.10 ГПа.

3. Значения относительного удлинения после разрыва для отвержденных образцов следующие: с 0% по масс. ГНТ – 6.99 %; с 5% по масс. ГНТ – 6.19 %; с 10% по масс. ГНТ – 5.91 %.

4. Предел прочности при одноосном растяжении был улучшен на +18,58%, модуль упругости - на +6,90%, относительное удлинение уменьшилось на -15,57% в образцах, содержащих 10% по масс. ГНТ.

5. В данном исследовании галлузитовые нанотрубки продемонстрировали свою эффективность в качестве наполнителя эпоксидной смолы, по сравнению с УНТ - частицы галлузита являются более предпочтительным вариантом, по причине их существенной дешевизны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Max Roser, Hannah Ritchie and Esteban Ortiz-Ospina (2020) – «World Population Growth». Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: <https://ourworldindata.org/world-population-growth> [Online Resource]
2. Гаврилов М.А. Особо плотные эпоксидные композиты на основе отходов производства : Монография. – Пенза: ПГУАС, 2014. - 132 С.
3. F. H. Gojny, M. H. G. Wichmann, B. Fiedler, and K. Schulte. Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – A comparative study // *Composites Science and Technology*. 2005. № 65(15-16). P. 2300–2313. DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.04.021
4. Du, C., Ming, P., Hou, M., Fu, J., Shen, Q., Liang, D., Yi, B. Preparation and properties of thin epoxy/compressed expanded graphite composite bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells // *Journal of Power Sources*. 2010. № 195(3). P. 794–800. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.08.033
5. Balakrishnan, S., Start, P. R., Raghavan, D., & Hudson, S. D. The influence of clay and elastomer concentration on the morphology and fracture energy of preformed acrylic rubber dispersed clay filled epoxy nanocomposites // *Polymer*. 2005. № 46(25). P. 11255–11262. DOI: 10.1016/j.polymer.2005.10.053
6. Imanaka, M.; Takeuchi, Y.; Nakamura, Y.; Nishimura, A.; Iida, T. Fracture Toughness of Spherical Silica-filled Epoxy Adhesives // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2001. № 21. P. 389-396. DOI: 10.1016/S0143-7496(01)00016-1
7. Kinloch, A. J., Lee, J. H., Taylor, A. C., Sprenger, S., Eger, C., & Egan, D. Toughening structural adhesives via nano- and micro-phase inclusions // *The Journal of Adhesion*. 2003. № 79(8-9). P. 867–873. DOI: 10.1080/00218460309551
8. Kinloch, A. J., & Taylor, A. C. *Journal of Materials Science Letters*. 2003. 22(20), P. 1439–1441. DOI: 10.1023/a:1025719715808
9. Koh, S.-W., Kim, J.-K., & Mai, Y.-W. Fracture toughness and failure mechanisms in silica-filled epoxy resin composites: effects of temperature and loading rate // *Polymer*. 1993. № 34(16). P. 3446–3455. DOI: 10.1016/0032-3861(93)90474-o
10. Njuguna, J., Pielichowski, K., & Alcock, J. R. (2007). Epoxy-Based Fibre Reinforced Nanocomposites // *Advanced Engineering Materials*. 2007. № 9(10). P. 835–847. DOI: 10.1002/adem.200700118
11. Lee, M. W., An, S., Lee, C., Liou, M., Yarin, A. L., & Yoon, S. S. Hybrid Self-Healing Matrix Using Core–Shell Nanofibers and Capsuleless Microdroplets // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2014. № 6(13). P. 10461–10468. DOI: 10.1021/am5020293
12. Klingler, A., Bajpai, A., & Wetzel, B. The effect of block copolymer and core-shell rubber hybrid toughening on morphology and fracture of epoxy-based fibre reinforced composites // *Engineering Fracture Mechanics*. 2018. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.06.044
13. Tsang, W. L., & Taylor, A. C. Fracture and toughening mechanisms of silica- and core–shell rubber-toughened epoxy at ambient and low temperature // *Journal of Materials Science*. 2019. DOI: 10.1007/s10853-019-03893-y
14. Keller, A., Chong, H. M., Taylor, A. C., Dransfeld, C., & Masania, K. Core-shell rubber nanoparticle reinforcement and processing of high toughness fast-curing epoxy composites // *Composites Science and Technology*. 2017. № 147. P. 78–88. DOI: 10.1016/j.compscitech.2017.05.002
15. Hussain, F., Hojjati, M., Okamoto, M., & Gorga, R. E. Review article: Polymer-matrix Nanocomposites, Processing, Manufacturing, and Application: An Overview // *Journal of Composite Materials*. 2006. № 40(17), P. 1511–1575. DOI:10.1177/0021998306067321
16. Sudheer, M., Prabhu, R., Raju, K., & Bhat, T. Effect of Filler Content on the Performance of Epoxy/PTW Composites // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014. P. 1–11. DOI:10.1155/2014/970468
17. Di, C., Yu, J., Wang, B., Lau, A. K. T., Zhu, B., & Qiao, K. Study of Hybrid Nanoparticles Modified Epoxy Resin Used in Filament Winding Composite // *Materials*. 2019. № 12(23). P. 3853. DOI:10.3390/ma12233853
18. F. H. Gojny, M. H. G. Wichmann, B. Fiedler, and K. Schulte. Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – A comparative study // *Composites Science and Technology*. 2005. № 65(15-16). P. 2300–2313. DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.04.021

19. Ganguli, S., Bhuyan, M., Allie, L., & Aglan, H. Effect of multi-walled carbon nanotube reinforcement on the fracture behavior of a tetrafunctional epoxy // *Journal of Materials Science*. 2005. № 40(13), P. 3593–3595. DOI: N10.1007/s10853-005-2891-x
20. Mikhalchan, A., Gspann, T., & Windle, A. Aligned carbon nanotube–epoxy composites: the effect of nanotube organization on strength, stiffness, and toughness // *Journal of Materials Science*. 2016. № 51(22), P. 10005–10025. DOI:10.1007/s10853-016-0228-6
21. Tariq, F., Shifa, M., & Baloch, R. A. Mechanical and Thermal Properties of Multi-scale Carbon Nanotubes–Carbon Fiber–Epoxy Composite // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2018. DOI:10.1007/s13369-018-3091-8
22. Интернет-магазин Ocsial [Электронный ресурс]. URL: <http://shop.ocsial.com/usa/product/tuball-100g/>. (Дата обращения: февраль 2020)
23. Интернет журнал «Эксперт-online» [Электронный ресурс] URL: <https://expert.ru/expert/2020/09/nanotrubki-na-nizkom-starte/>. (Дата обращения: февраль 2020).
24. Joussein, E., Petit, S., Churchman, J., Theng, B., Righi, D., & Delvaux, B. Halloysite clay minerals — a review // *Clay Minerals*. 2005. № 40(04). P. 383–426. DOI: 10.1180/0009855054040180.
25. Lvov, Y. M., Shchukin, D. G., Möhwald, H., & Price, R. R. Halloysite Clay Nanotubes for Controlled Release of Protective Agents // *ACS Nano*. 2008. № 2(5), P. 814–820. DOI:10.1021/nn800259q
26. Lazzara, G., Cavallaro, G., Panchal, A., Fakhrullin, R., Stavitskaya, A., Vinokurov, V., & Lvov, Y. An assembly of organic-inorganic composites using halloysite clay nanotubes // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2018. № 35. P. 42–50. DOI: 10.1016/j.cocis.2018.01.002
27. Cavallaro, G., Chiappisi, L., Pasbakhsh, P., Gradzielski, M., & Lazzara, G. A structural comparison of halloysite nanotubes of different origin by Small-Angle Neutron Scattering (SANS) and Electric Birefringence // *Applied Clay Science*. 2018. №160, P. 71–80. DOI: 10.1016/j.clay.2017.12.044
28. Lvov, Y., Wang, W., Zhang, L., & Fakhrullin, R. Halloysite Clay Nanotubes for Loading and Sustained Release of Functional Compounds // *Advanced Materials*. 2015. № 28(6). P. 1227–1250. DOI: 10.1002/adma.201502341
29. Vergaro, V., Abdullayev, E., Lvov, Y. M., Zeitoun, A., Cingolani, R., Rinaldi, R., & Leporatti, S. Cyto-compatibility and Uptake of Halloysite Clay Nanotubes // *Biomacromolecules*. 2010. № 11(3), P. 820–826. DOI: 10.1021/bm9014446
30. Santos, A. C., Ferreira, C., Veiga, F., Ribeiro, A. J., Panchal, A., Lvov, Y., & Agarwal, A. Halloysite clay nanotubes for life sciences applications: From drug encapsulation to bioscaffold // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2018. № 257, P. 58–70. DOI: 10.1016/j.cis.2018.05.007
31. Abdullayev, E., & Lvov, Y. Clay nanotubes for corrosion inhibitor encapsulation: release control with end stoppers // *Journal of Materials Chemistry*. 2010. № 20(32). P. 6681. DOI: 10.1039/c0jm00810a
32. Cavallaro, G., Danilushkina, A., Evtugyn, V., Lazzara, G., Milioto, S., Parisi, F., Fakhrullin, R. Halloysite Nanotubes: Controlled Access and Release by Smart Gates // *Nanomaterials*. 2017. № 7(8), P. 199. DOI: 10.3390/nano7080199
33. Joussein, E., Petit, S., Churchman, J., Theng, B., Righi, D., & Delvaux, B. Halloysite clay minerals — a review // *Clay Minerals*. 2005. № 40(04). P. 383–426. DOI: 10.1180/0009855054040180.
34. Lvov, Y. M., Shchukin, D. G., Möhwald, H., & Price, R. R. Halloysite Clay Nanotubes for Controlled Release of Protective Agents // *ACS Nano*. 2008. № 2(5), P. 814–820. DOI:10.1021/nn800259q
35. Lisuzzo, L., Cavallaro, G., Parisi, F., Milioto, S., & Lazzara, G. Colloidal stability of halloysite clay nanotubes // *Ceramics International*. 2018. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.07.289
36. Liu, M., Guo, B., Du, M., Cai, X., & Jia, D. Properties of halloysite nanotube–epoxy resin hybrids and the interfacial reactions in the systems // *Nanotechnology*. 2007. № 18(45), 455703. DOI:10.1088/0957-4484/18/45/455703
37. Ye, Y., Chen, H., Wu, J., & Ye, L. High impact strength epoxy nanocomposites with natural nanotubes // *Polymer*. 2007. № 48(21). P. 6426–6433. DOI: 10.1016/j.polymer.2007.08.035
38. Ghaleb, Z., Mariatti, M., & Ariff, Z. Synergy effects of graphene and multiwalled carbon nanotubes hybrid system on properties of epoxy nanocomposites // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. № 36(9). P. 685–695. DOI: 10.1177/0731684417692055
39. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 56800-2015 «Композиты полимерные. Определение механических свойств при растяжении неармированных и армированных материалов

REFERENCES

1. Max Roser, Hannah Ritchie and Esteban Ortiz-Ospina (2020) – «World Population Growth». Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: <https://ourworldindata.org/world-population-growth> [Online Resource]
2. Gavrilov M.A. Osobo plotnyye epoksidnyye kompozity na osnove otkhodov proizvodstva : Monografiya. – Penza: PGUAS, 2014. - 132 S.

3. F. H. Gojny, M. H. G. Wichmann, B. Fiedler, and K. Schulte. Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – A comparative study // *Composites Science and Technology*. 2005. № 65(15-16). P. 2300–2313. DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.04.021
4. Du, C., Ming, P., Hou, M., Fu, J., Shen, Q., Liang, D., Yi, B. Preparation and properties of thin epoxy/compressed expanded graphite composite bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells // *Journal of Power Sources*. 2010. № 195(3). P. 794–800. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.08.033
5. Balakrishnan, S., Start, P. R., Raghavan, D., & Hudson, S. D. The influence of clay and elastomer concentration on the morphology and fracture energy of preformed acrylic rubber dispersed clay filled epoxy nanocomposites // *Polymer*. 2005. № 46(25). P. 11255–11262. DOI: 10.1016/j.polymer.2005.10.053
6. Imanaka, M.; Takeuchi, Y.; Nakamura, Y.; Nishimura, A.; Iida, T. Fracture Toughness of Spherical Silica-filled Epoxy Adhesives // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2001. № 21. P. 389-396. DOI: 10.1016/S0143-7496(01)00016-1
7. Kinloch, A. J., Lee, J. H., Taylor, A. C., Sprenger, S., Eger, C., & Egan, D. Toughening structural adhesives via nano- and micro-phase inclusions // *The Journal of Adhesion*. 2003. № 79(8-9). P. 867–873. DOI: 10.1080/00218460309551
8. Kinloch, A. J., & Taylor, A. C. *Journal of Materials Science Letters*. 2003. 22(20), P. 1439–1441. DOI: 10.1023/a:1025719715808
9. Koh, S.-W., Kim, J.-K., & Mai, Y.-W. Fracture toughness and failure mechanisms in silica-filled epoxy resin composites: effects of temperature and loading rate // *Polymer*. 1993. № 34(16). P. 3446–3455. DOI: 10.1016/0032-3861(93)90474-o
10. Njuguna, J., Pielichowski, K., & Alcock, J. R. (2007). Epoxy-Based Fibre Reinforced Nanocomposites // *Advanced Engineering Materials*. 2007. № 9(10). P. 835–847. DOI: 10.1002/adem.200700118
11. Lee, M. W., An, S., Lee, C., Liou, M., Yarin, A. L., & Yoon, S. S. Hybrid Self-Healing Matrix Using Core-Shell Nanofibers and Capsuleless Microdroplets // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2014. № 6(13). P. 10461–10468. DOI: 10.1021/am5020293
12. Klingler, A., Bajpai, A., & Wetzel, B. The effect of block copolymer and core-shell rubber hybrid toughening on morphology and fracture of epoxy-based fibre reinforced composites // *Engineering Fracture Mechanics*. 2018. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.06.044
13. Tsang, W. L., & Taylor, A. C. Fracture and toughening mechanisms of silica- and core-shell rubber-toughened epoxy at ambient and low temperature // *Journal of Materials Science*. 2019. DOI: 10.1007/s10853-019-03893-y
14. Keller, A., Chong, H. M., Taylor, A. C., Dransfeld, C., & Masania, K. Core-shell rubber nanoparticle reinforcement and processing of high toughness fast-curing epoxy composites // *Composites Science and Technology*. 2017. № 147. P. 78–88. DOI: 10.1016/j.compscitech.2017.05.002
15. Hussain, F., Hojjati, M., Okamoto, M., & Gorga, R. E. Review article: Polymer-matrix Nanocomposites, Processing, Manufacturing, and Application: An Overview // *Journal of Composite Materials*. 2006. № 40(17), P. 1511–1575. DOI:10.1177/0021998306067321
16. Sudheer, M., Prabhu, R., Raju, K., & Bhat, T. Effect of Filler Content on the Performance of Epoxy/PTW Composites // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014. P. 1–11. DOI:10.1155/2014/970468
17. Di, C., Yu, J., Wang, B., Lau, A. K. T., Zhu, B., & Qiao, K. Study of Hybrid Nanoparticles Modified Epoxy Resin Used in Filament Winding Composite // *Materials*. 2019. № 12(23). P. 3853. DOI:10.3390/ma12233853
18. F. H. Gojny, M. H. G. Wichmann, B. Fiedler, and K. Schulte. Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – A comparative study // *Composites Science and Technology*. 2005. № 65(15-16). P. 2300–2313. DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.04.021
19. Ganguli, S., Bhuyan, M., Allie, L., & Aglan, H. Effect of multi-walled carbon nanotube reinforcement on the fracture behavior of a tetrafunctional epoxy // *Journal of Materials Science*. 2005. № 40(13), P. 3593–3595. DOI: N10.1007/s10853-005-2891-x
20. Mikhailchan, A., Gspann, T., & Windle, A. Aligned carbon nanotube-epoxy composites: the effect of nanotube organization on strength, stiffness, and toughness // *Journal of Materials Science*. 2016. № 51(22), P. 10005–10025. DOI:10.1007/s10853-016-0228-6
21. Tariq, F., Shifa, M., & Baloch, R. A. Mechanical and Thermal Properties of Multi-scale Carbon Nanotubes-Carbon Fiber-Epoxy Composite // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2018. DOI:10.1007/s13369-018-3091-8
22. Internet-magazin Ocsial [Elektronnyy resurs]. URL: <http://shop.ocsial.com/usa/product/tuball-100g/>. (Data obrashcheniya: fevral 2020)
23. Internet zhurnal «Ekspert-online» [Elektronnyy resurs] URL: <https://expert.ru/expert/2020/09/nanotrubkina-nizkom-starte/>. (Data obrashcheniya: fevral 2020).
24. Joussein, E., Petit, S., Churchman, J., Theng, B., Righi, D., & Delvaux, B. Halloysite clay minerals — a review // *Clay Minerals*. 2005. № 40(04). P. 383–426. DOI: 10.1180/0009855054040180.
25. Lvov, Y. M., Shchukin, D. G., Möhwald, H., & Price, R. R. Halloysite Clay Nanotubes for Controlled Release of Protective Agents // *ACS Nano*. 2008. № 2(5), P. 814–820. DOI:10.1021/nn800259q

26. Lazzara, G., Cavallaro, G., Panchal, A., Fakhrullin, R., Stavitskaya, A., Vinokurov, V., & Lvov, Y. An assembly of organic-inorganic composites using halloysite clay nanotubes // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2018. № 35. P. 42–50. DOI: 10.1016/j.cocis.2018.01.002
27. Cavallaro, G., Chiappisi, L., Pasbakhsh, P., Gradzielski, M., & Lazzara, G. A structural comparison of halloysite nanotubes of different origin by Small-Angle Neutron Scattering (SANS) and Electric Birefringence // *Applied Clay Science*. 2018. №160, P. 71–80. DOI: 10.1016/j.clay.2017.12.044
28. Lvov, Y., Wang, W., Zhang, L., & Fakhrullin, R. Halloysite Clay Nanotubes for Loading and Sustained Release of Functional Compounds // *Advanced Materials*. 2015. № 28(6). P. 1227–1250. DOI: 10.1002/adma.201502341
29. Vergaro, V., Abdullayev, E., Lvov, Y. M., Zeitoun, A., Cingolani, R., Rinaldi, R., & Leporatti, S. Cyto-compatibility and Uptake of Halloysite Clay Nanotubes // *Biomacromolecules*. 2010. № 11(3), P. 820–826. DOI: 10.1021/bm9014446
30. Santos, A. C., Ferreira, C., Veiga, F., Ribeiro, A. J., Panchal, A., Lvov, Y., & Agarwal, A. Halloysite clay nanotubes for life sciences applications: From drug encapsulation to bioscaffold // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2018. № 257, P. 58–70. DOI: 10.1016/j.cis.2018.05.007
31. Abdullayev, E., & Lvov, Y. Clay nanotubes for corrosion inhibitor encapsulation: release control with end stoppers // *Journal of Materials Chemistry*. 2010. № 20(32). P. 6681. DOI: 10.1039/c0jm00810a
32. Cavallaro, G., Danilushkina, A., Evtugyn, V., Lazzara, G., Milioto, S., Parisi, F. Fakhrullin, R. Halloysite Nanotubes: Controlled Access and Release by Smart Gates // *Nanomaterials*. 2017. № 7(8), P. 199. DOI: 10.3390/nano7080199
33. Joussein, E., Petit, S., Churchman, J., Theng, B., Righi, D., & Delvaux, B. Halloysite clay minerals — a review // *Clay Minerals*. 2005. № 40(04). P. 383–426. DOI: 10.1180/0009855054040180.
34. Lvov, Y. M., Shchukin, D. G., Möhwald, H., & Price, R. R. Halloysite Clay Nanotubes for Controlled Release of Protective Agents // *ACS Nano*. 2008. № 2(5), P. 814–820. DOI:10.1021/nn800259q
35. Lisuzzo, L., Cavallaro, G., Parisi, F., Milioto, S., & Lazzara, G. Colloidal stability of halloysite clay nanotubes // *Ceramics International*. 2018. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.07.289
36. Liu, M., Guo, B., Du, M., Cai, X., & Jia, D. Properties of halloysite nanotube–epoxy resin hybrids and the interfacial reactions in the systems // *Nanotechnology*. 2007. № 18(45), 455703. DOI:10.1088/0957-4484/18/45/455703
37. Ye, Y., Chen, H., Wu, J., & Ye, L. High impact strength epoxy nanocomposites with natural nanotubes // *Polymer*. 2007. № 48(21). P. 6426–6433. DOI: 10.1016/j.polymer.2007.08.035
38. Ghaleb, Z., Mariatti, M., & Ariff, Z. Synergy effects of graphene and multiwalled carbon nanotubes hybrid system on properties of epoxy nanocomposites // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. № 36(9). P. 685–695. DOI: 10.1177/0731684417692055
39. National standard of the Russian Federation GOST R 56800-2015 «Polymer composites. Determination of mechanical tensile properties of unreinforced and reinforced materials»

Информация об авторах

Ткач Евгения Владимировна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,
д-р техн. наук., профессор, профессор кафедры строительных материалов и материаловедения
E-mail: ev_tkach@mail.ru

Бичаев Максим Игоревич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,
Аспирант кафедры строительных материалов и материаловедения
E-mail: bichaev.maxim@gmail.com

Information about authors

Tkach Evgeniya V.

National Research Moscow State Civil Engineering University, Moscow, Russia,
doctor in tech. sc., prof., prof. of the dep. of building materials and materials science
E-mail: ev_tkach@mail.ru

Bichaev Maxim I.

National Research Moscow State Civil Engineering University, Moscow, Russia,
postgraduate student of the dep. of building materials and materials science
E-mail: bichaev.maxim@gmail.com

Ю.А. ЩЕПОЧКИНА¹

¹ Ивановский государственный политехнический университет, г. Иваново, Россия

ИСКУССТВЕННЫЙ МРАМОР С ВКЛЮЧЕНИЕМ МОЛОТЫХ СТЕКЛООТХОДОВ

Аннотация. На протяжении последних 150 лет находит применение искусственный мрамор, который может иметь разнообразные расцветку и фактуру, а также обладает способностью легко принимать необходимую форму при изготовлении деталей любой сложности. Существует множество способов получения искусственного мрамора и рецептов смесей, большинство из которых в качестве вяжущего вещества включает цемент, а в качестве заполнителя – кварцевый песок.

В данной работе показано, что молотые стеклоотходы могут стать заменой кварцевого песка или его части при приготовлении смесей для получения искусственного мрамора, что приводит к повышению прочности материала при сжатии и снижению его водопоглощения.

В качестве окрашивающих добавок при получении искусственного мрамора апробированы черный железистый пигмент, охра светлая, редоксайд. Предложено неравномерно распределять эти добавки в смесях с включением молотых стеклоотходов, что позволяет достичь приближенного сходства внешнего вида получаемого материала с натуральным мрамором.

Ключевые слова: искусственный мрамор, стеклоотходы, окрашивающие добавки

J.A. SHCHEPOCHKINA¹

¹Ivanovo State Polytechnical University, Ivanovo, Russia

MODIFICATION OF FINE-GRAINED CONCRETE ADDITIVES CRUSHED PLASTIC

Abstract. Over the past 150 years, artificial marble has been used, which can have a variety of colors and textures, and also has the ability to easily take the required shape in the manufacture of parts of any complexity. There are many ways to obtain artificial marble and formulations of mixtures, most of which include cement as a binder and quartz sand as an aggregate.

This paper shows that ground glass waste can be a substitute for quartz sand or a part of it in the preparation of mixtures for producing artificial marble, which leads to an increase in the strength of the material in compression and a decrease in its water absorption.

Black iron oxide pigment, light ocher, redoxide have been approved as coloring additives in the production of artificial marble. It is proposed to unevenly distribute these additives in mixtures with the inclusion of ground glass waste, which makes it possible to achieve an approximate similarity in the appearance of the resulting material with natural marble.

Keywords: artificial marble, glass waste, coloring additives

Введение

На протяжении последних 150 лет в строительстве находит применение искусственный мрамор – недорогой и экологически безопасный заменитель природного материала.

Искусственный мрамор может иметь разнообразные расцветку и фактуру, а также обладает способностью легко принимать необходимую форму при изготовлении деталей любой сложности. Окраску искусственного мрамора можно создать различными методами – использованием цветных заполнителей, вяжущих, введением окрашивающих добавок. Существует множество способов получения искусственного мрамора и рецептов смесей [1-6], большинство из которых в качестве вяжущего вещества включает портландцемент, а в качестве заполнителя – кварцевый песок. При этом возможно получение искусственного мрамора различных

цветовых оттенков, например, серовато-зеленого, серого [4, 5]. Наряду с применением равномерно окрашенных смесей для получения искусственного мрамора, можно добиться нужного эффекта – имитации внешнего вида природного материала – за счет неравномерного распределения в смеси окрашивающих добавок.

Интересен способ [3] получения искусственного мрамора в формах со стеклянным дном, предусматривающий неравномерное смешивание нескольких различно окрашенных смесей на основе портландцемента и кварцевого песка с применением вибрации, а также использование смесей с разной подвижностью. Способ [6] изготовления многоцветной мрамороподобной плитки также включает приготовление нескольких смесей портландцемента и воды с разной подвижностью, при этом, по крайней мере, одна смесь должна содержать окрашивающую добавку. В качестве окрашивающих добавок рекомендуются оксид марганца, сухой ультрамарин, натуральная амбра, сурик железистый и др.

Приведенные выше способы получения искусственного мрамора являются достаточно трудоемкими и предполагают использование в качестве заполнителя кварцевого песка. Вместе с тем, возможно использование и иного заполнителя, если его введение в состав смеси будет способствовать повышению эксплуатационных свойств получаемого материала, прежде всего, прочности.

Целью данной работы являлось получение искусственного мрамора, приближенного по внешнему виду к натуральному материалу.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи: исследование возможности замены используемого в качестве заполнителя кварцевого песка или его части молотыми стеклоотходами; разработка методики получения искусственного мрамора с неравномерным внесением окрашивающих добавок

Методы исследования

Известно, что прочность цементно-песчаного раствора на кварцевом песке ниже прочности цементного камня. В частности, на обычных цементах получается цементный камень, превышающий в 2 раза марку (активность) цемента по прочности, определяемую в соответствии со стандартом путем испытания образцов из цементно-песчаного раствора 1:3 [7, 8]. Если провести с цементом опыт [8], аналогичный его стандартному испытанию, но вместо нормального (вольского) песка использовать природный кварцевый с менее окатанными (более шероховатыми) зернами, то прочность образцов повысится (на 15-25 %), но все равно будет ниже прочности цементного камня. Если вместо природного песка использовать дробленый песок из скальных пород, то можно добиться некоторого повышения прочности конечного продукта, хотя и в дробленном песке зерна имеют гладкие грани, представляя собой отдельные кристаллы минералов. При этом некоторые кристаллические минералы при дроблении разрушаются с разрывом межатомных связей. Обнаружено [8], что свежедробленные кварцевые заполнители в силу ионизации поверхности зерен приобретают на короткое время физико-химическую активность, что проявляется в повышении прочности бетона за счет лучшего сцепления. Однако прочность сцепления цементного камня с поверхностью зерен песка меньше прочности цементного камня, поэтому последняя в цементно-песчаном растворе недоиспользуется. Вещество, из которого состоят зерна заполнителя, может иметь структуру аморфную или кристаллическую. Аморфная структура материала определяет его изотропность. Кристаллы в принципе анизотропны, что проявляется в неравномерности температурных деформаций и в других нежелательных эффектах [8, 9]. Кварцосодержащим аморфным материалом, частично лишенным этих недостатков, является стекло.

Современные принципы утилизации стеклоотходов основаны на использовании тех свойств стекла, которые близки к свойствам заменяемого продукта [10]. Наиболее перспективным направлением использования отходов является рассмотрение их как самостоятельного вида сырья, что позволяет создавать новые материалы с комплексом заданных свойств [11, 12]. Таким образом, молотые отходы стекла могут стать заменой кварцевого песка или его ча-

сти при приготовлении смесей для получения традиционных мелкозернистых бетонов [13,14], а также искусственного мрамора. Кроме того, применение стеклоотходов позволяет получать материал, по внешнему виду наиболее приближенный к природному мрамору, а их утилизация является достаточно актуальной проблемой, если учитывать, что в мире ежегодно накапливается порядка 1,5-2,4 млрд. т. не утилизированных отходов стекла [15, 16].

В рамках данного исследования было приготовлено четыре серии составов смесей для получения искусственного мрамора с включением различных долей стеклоотходов и изучены свойства полученного материала. В качестве вяжущего во всех составах использовали белый портландцемент ЦЕМ II/A-И 32,5Н, а в качестве заполнителей – просеянный через сито 2,5 песок для строительных работ (ГОСТ 8736-93), молотый и просеянный через сито 2,5 бой наиболее распространенного стекла – листового оконного (ГОСТ 111-2014).

Составы смесей для получения искусственного мрамора приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Составы смесей для получения искусственного мрамора

Компоненты	Содержание мас. ч.			
	1	2	3	4
Белый портландцемент ЦЕМ II/A-И 32,5Н	1	1	1	1
Кварцевый песок, просеянный через сито 2,5	3	2	1	-
Молотый бой листового оконного стекла, просеянный через сито 2,5	-	1	2	3
Водоцементное отношение	0,5			

Результаты исследования и их анализ

В рамках исследования было установлено влияние доли молотого боя стекла на основные эксплуатационные характеристики полученного материала, рис. 1-3.

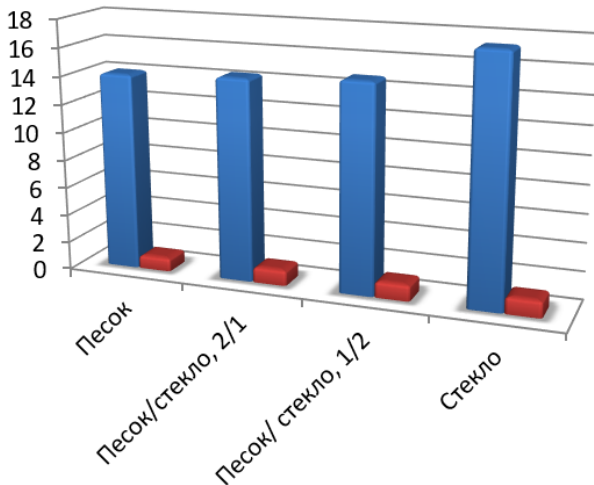


Рисунок 1 - Предел прочности (МПа) образцов искусственного мрамора в возрасте 28 сут

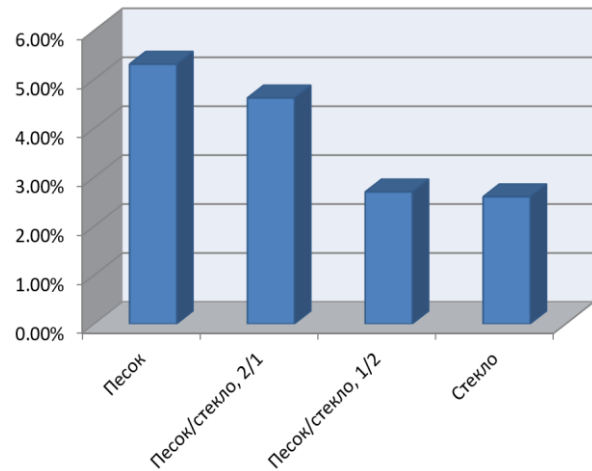


Рисунок 2 - Водопоглощение (%) образцов искусственного мрамора в возрасте 28 сут

Из рис.1 и 2 видно, что молотые стеклоотходы оказывают положительное влияние на эксплуатационные характеристики искусственного мрамора. При этом наиболее целесообразен к применению состав 3 (таблица).

При получении смесей на основе состава 3 в качестве окрашивающих добавок были апробированы черный железистоокисный пигмент, охра светлая, редоксайд, соответственно 5, 4 и 4 % от массы портландцемента. Добавки были введены так, чтобы достичь приближенного сходства внешнего вида получаемого материала с натуральным мрамором. Для приготовления

искусственного мрамора смешивали сухие компоненты: молотый и просеянный через сито 2,5 бой листового оконного стекла, кварцевый песок и белый портландцемент. Затем в емкость со смесью сухих компонентов вливали 80 % воды и осуществляли перемешивание до образования однородной массы. Затем добавляли остаток воды и окрашивающие добавки, которые вводили порциями в разные участки емкости. Таким образом, достигалось неравномерное их распределение в смеси, что придавало большее сходство искусственному материалу с натуральным мрамором. Чтобы добиться неравномерности распределения нескольких окрашивающих добавок готовили также два и более различно окрашенных составов смеси, которые впоследствии соединяли и неравномерно перемешивали. Используемая для укладки смесей форма (предпочтительно, пластмассовая) должна иметь гладкую внутреннюю поверхность. После смазки внутренней поверхности формы минеральным маслом в нее наливали приготовленную смесь. При помощи шпателя края формы очищали от излишних наплывов, которые способны оказывать влияние на внешний вид поверхности материала, затем разравнивали поверхность и закрывали ее полиэтиленовой пленкой.

Внешний вид поверхности образцов полученного искусственного мрамора представлен на рис. 3.

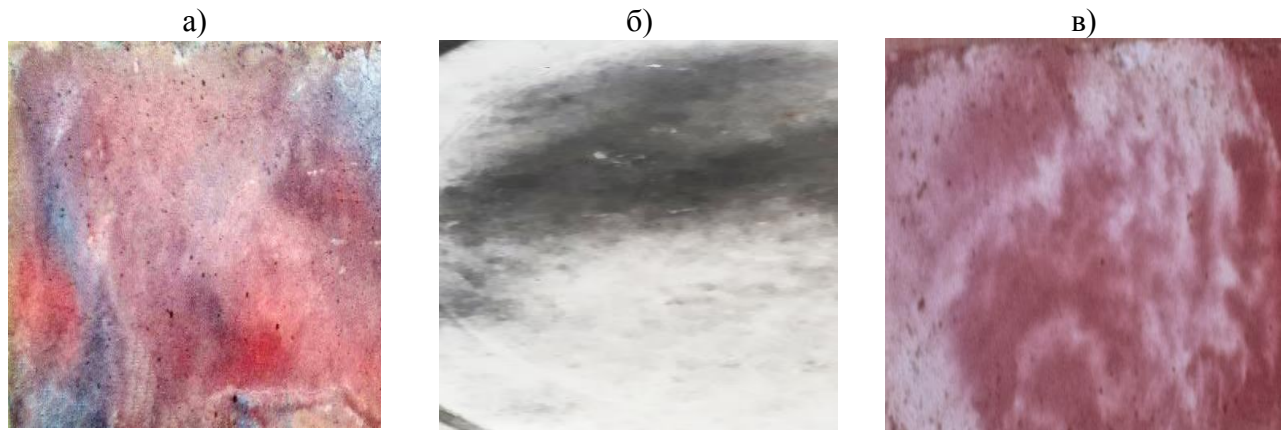


Рисунок 3 - Фрагменты поверхности образцов искусственного мрамора (состав смеси 3) с использованием в качестве окрашивающих добавок: а) черного железooksидного пигмента, охры светлой, редоксайда; б) черного железooksидного пигмента; в) охры светлой и редоксайда

На основании полученных данных можно полагать, что в случае использования в составе смеси для получения искусственного мрамора в качестве заполнителя молотых отходов стекла (той же дисперсности, что и кварцевый песок) адгезионное взаимодействие частиц стекла с цементным тестом возрастает за счет повышения качества растворной прослойки между ними и цементным тестом. Это связано, на наш взгляд, с тем, что частицы стекла имеют значительно меньшее количество дефектов структуры по сравнению с частицами кварцевого песка. Аморфная структура отходов стекла определяет изотропность частиц заполнителя, что является положительным фактором, поскольку обычно не удается управлять пространственной ориентацией частиц заполнителя и они располагаются случайно.

Выводы

1. В составах для получения искусственного мрамора замена кварцевого песка или его части молотыми стеклоотходами приводит к повышению прочности материала при сжатии и снижению его водопоглощения.

2. Использование в составах для получения искусственного мрамора в качестве окрашивающих добавок черного железooksидного пигмента, охры светлой и редоксайда, соответственно 5, 4 и 4 % от массы портландцемента, при их неравномерном введении позволяет достичь приближенного сходства внешнего вида получаемого материала с мрамором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щепочкина Ю.А. Рецептурный справочник по имитации материалов. – Минск: Национальная библиотека Беларуси, 2014. –103 с.
2. Черных В.Ф. Стеновые и отделочные материалы. М.: Росагропромиздат, 1991. – 188 с.
3. Способ изготовления декоративных строительных изделий / Г.П. Олефиренко, Б.Ш. Цибульская; а.с. № 627102 СССР. № 2347212/29-33; заявл. 12.04.1976; опубл. 05.10.1978, бюл. № 37. – 2 с.
4. Александровский А.В., Попов К.Н. Материалы для декоративных, штукатурных, плиточных и мозаичных работ. – М.: Высш. шк., 1986. – 240 с.
5. Щепочкина Ю.А. Декоративные бетоны. – Иваново: ИВГПУ, 2019. – 120 с.
6. Способ изготовления многоцветной мрамороподобной плитки // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2012. – № 12. – С. 51.
7. Гусев Б.В., Ин Иен-лян С., Кузнецова Т.В. Цементы и бетоны – тенденции развития. – М.: Научный мир, 2012. – 136 с.
8. Ицкович С.М., Чумаков Л.Д., Баженов Ю.М. Технология заполнителей бетона. – М.: Высш. шк., 1991. – 272 с.
9. Федосов С.В., Селезнева Г.Ю., Щепочкина Ю.А. Технология неорганических вяжущих веществ. – Иваново: ИВГПУ, 2018. – 232 с.
10. Kruszywa alternatywne. Cz. 2 / W. Kozioł, A. Ciepliński, Ł. Machniak, A. Borecz // Nowoczesne budownictwo inżynieryjne. – 2015. – N 5. S. 35-38.
11. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н. Мониторинг возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами. – Минск: БНТУ, 2016. – 331 с.
12. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях / Леонович С.Н., Литвиновский Д.А., Чернякевич О.Ю., Степанова А.В. Под ред. С.Н. Леоновича. – Минск: БНТУ, 2016. – 393 с.
13. Харченко И.Я., Баженов Д.А. Эффективный самоуплотняющийся мелкозернистый бетон с компенсированной усадкой // Строительные материалы. – 2018. – № 5. С. 48-52.
14. Лермит Р. Проблемы технологии бетона / Пер. с фр. Под ред. А.Е. Десова. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007. – 296 с.
15. Дворкин О.Л. Строительные материалы из отходов промышленности. Ростов-на-Дону: Феникс, 2007. – 368 с.
16. Вторичные материальные ресурсы для строительной индустрии. / С. В. Федосов, Ю. А. Щепочкина, В. Е. Румянцева, В. С. Коновалова – Иваново: ИВГПУ, 2017. – 188 с.

REFERENCES

1. Shchepochkina Ju. A. Recepturnyi spravochnik po imitacii materialov. – Minsk: Nacionalnaya biblioteka Belarusi, 2014. – 103 p.
2. Chernykh V.F. Stenovye i odelochnye materialy. M.: Rosagropromizdat, 1991. – 188 p.
3. Sposob izgotovleniya dekorativnykh stroitelnykh izdelyi / G.P. Olefirenko, B.Sh. Cybul'skaya; A.s. 627102 USSR. No. 2347212/29-33; zayavl. 12.04.1976; opubl. 05.10.1978, bul. No 37. – 2 p.
4. Alexandrovski A.V., Popov K.N. Materialy dla dekorativnykh, shtukaturnykh, plitochnykh i mozaichnykh rabot. – M.: Vysshaja shkola, 1986. – 240 p.
5. Shchepochkina Ju. A. Dekorativnye betony. – Ivanovo: IVGPU, 2019. – 120 p.
6. Sposob izgotovleniya mnogozhvetnoj mramoropodobnoj plitki // Stroitelnye materialy, oborudovanie, technologii XXI veka. – 2012. – № 12. – p. 51.
7. Gusev B.V., In Ien-lyan S., Kuznetsova T.V. Cementy i betony – tendencyi razvitiya. – M.: Nauchnyi mir, 2012. – 136 p.
8. Izhkovich S.M., Chumakov L.D., Bazhenov Ju..M. Technologija zapolnitelej betona. – M.: Vysshaja shkola, 1991. – 272 p.
9. Fedosov S.V., Selezneva G.Ju., Shchepochkina Ju. A Technologija neorganicheskikh vjzhashchikh veschestv – Ivanovo: IVGPU, 2018. – 232 p.
10. Kruszywa alternatywne. Cz. 2 / W. Kozioł, A. Ciepliński, Ł. Machniak, A. Borecz // Nowoczesne budownictwo inżynieryjne. – 2015. – N 5. S. 35-38.
11. Snezhkov D.Yu., Leonovich S.N. Monitoring vozvodimyh i ekspluatiruemykh zhelezobetoonykh konstrukcij nerazrushayuschimi metodami. – Minsk: BNTU, 2016. – 331 p.
12. Prochnost, treschinostoičnost i dolgovechnost konstrukcionnogo betona pri temperaturnykh i korrozionnykh vozdeistviyakh / Leonovich S.N., Litvinovskij D.A. Chernyakevich O.Yu., Stepanova A.V. / Pod red. S.N. Leonovich. – Minsk: BNTU, 2016. – 393 p.
13. Kharchenko I.Ja., Bazhenov D.A. Effektyvnyi samouplotnyauschiysya melkozernisty beton s kompensirovannoy usadkoi // Stroitelnye materialy. – 2018. – No 5. P. 48-52.

14. Lermontov R. Problemy tekhnologii betona / Per. s fr. / Pod red. A.E. Desova. – M.: Izd. LKI, 2007. – 296 p.
15. Dvorkin O.L. Stroitelnye materialy iz otkhodov promyshlennosti. – Rostov-na-Donu: Fenix, 2007. – 368 p.
16. Vtorichnye materialnye resursy dlya stroitelnoi industrii. / S.V. Fedosov, Ju. A. Schepotchkina, V.E. Rummyantseva, V. S. Konovalova – Ivanovo: IVGPU, 2017. – 188 p.

Информация об авторах

Щепочкина Юлия Алексеевна

Ивановский государственный политехнический университет, г. Иваново, Россия

Доктор технических наук, профессор. Кафедра «Строительное материаловедение и технологии»

E-mail: julia2004ivanovo@yandex.ru.

Information about authors

Shchepochkina Julia A.

Ivanovo State Polytechnical University, Ivanovo, Russia,

Doctor of technical science, professor of department “Building materials and technologies”

E-mail: julia2004ivanovo@yandex.ru.

Уважаемые авторы!
Просим Вас ознакомиться с основными требованиями
к оформлению научных статей

- Представляемый материал должен быть **оригинальным, не опубликованным ранее** в других печатных изданиях.
- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется 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 Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и вверху – 2 см.
- 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»
302006, 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 15.05.2020 г.
Дата выхода в свет 29.05.2020 г.
Формат 70×108 1/16. Печ. л. 8,625.
Цена свободная. Тираж 500 экз.
Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической
базе ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.