

NEWS

Kazan
State
University
Architecture
Engineering

ISSN 2073-1523

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА, АРХИТЕКТУРЫ
И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА РТ

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И ДОРОЖНОГО ХОЗЯЙСТВА РТ

Известия КГАСУ
2022г., №3 (61)

ББК 38
И 33
УДК 69

Главный редактор: д-р техн. наук, проф. чл.-корр. АН РТ Р.К. Низамов
Зам. главного редактора: канд. техн. наук, доц. Е.А. Вдовин

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Айдарова Г.Н., д-р арх., проф. советник РААСН;
Гагарин В.Г., д-р техн. наук, проф. чл.-корр. РААСН;
Горячев М.Г., д-р техн. наук, проф.;
Есаулов Г.В., д-р арх., проф., академик РААСН;
Ильичев В.А., д-р техн. наук, проф., первый вице-президент РААСН;
Каюмов Р.А., д-р физ.-мат. наук, проф.;
Кичигин В.И., д-р техн. наук, проф.;
Королев Е.В., д-р техн. наук, проф.;
Кочев А.Г., д-р техн. наук, проф.;
Логачев К.И., д-р техн. наук, проф.;
Мирсаяпов Илизар Т., д-р техн. наук, проф.;
Мирсаяпов Ильшат Т., д-р техн. наук, проф.;
Стрелков А.К., д-р техн. наук, проф.;
Строганов В.Ф., д-р хим. наук, проф., почетный член РААСН;
Сулейманов А.М., д-р техн. наук, проф. чл.-корр. АН РТ;
Тунакова Ю.А., д-р хим. наук, проф.;
Углова Е.В., д-р техн. наук, проф.;
Хозин В.Г., д-р техн. наук, проф.;
Шагидуллин Р.Р., д-р хим. наук, чл.-корр. АН РТ;
Яковлев Г.И., д-р техн. наук, проф.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Рольф Катценбах, д-р техн. наук, проф. (Германия);
Фиговский О.Л., д-р техн. наук, проф., член Европейской АН, иностранный член РААСН (Израиль);
Фишер Х.-Б., доктор-инженер (Германия);
Хассан Абдалла, д-р наук (PhD), проф. (Великобритания);
Янотка И., д-р техн. наук, с.н.с. (Словакия).

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:
ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, определяемый Высшей аттестационной комиссией (ВАК), рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук. Статьи рецензируются. Перепечатка без разрешения редакции запрещена, ссылки на журнал при цитировании обязательны.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Регистрационный номер ПИ № ФС77-77410 от 17 декабря 2019г.). Включен в электронный каталог АО «ПОЧТА-РОССИИ», индекс издания – ПП890. Включен в подписной каталог ГК «Урал - Пресс» индекс издания – 36939.

АДРЕС РЕДАКЦИИ:
420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1, ком. 79
Тел. (843) 510-46-39
E-mail: patent@kgasu.ru Сайт: http://izvestija.kgasu.ru

© Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета, 2022

ISSN 2073-1523

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION

KAZAN STATE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE AND ENGINEERING

MINISTRY OF CONSTRUCTION, ARCHITECTURE AND HOUSING
OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN

MINISTRY OF TRANSPORT AND ROADS
OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN

News KSUAE
2022, № 3 (61)

BBC 38
I 33
UDC 69

Editor-in-Chief: Dr. tech. sci., prof. corr.-m. AS RT Nizamov R.K.
Deputy Editor-in-Chief: Cand. tech. sci., associate prof. Vdovin E.A.

EDITORIAL BOARD:

Aidarova G.N. Dr. arch. sci., prof., advisor of RAACS;
Gagarin V.G., Dr. tech. sci., prof. corr.-m. of RAACS;
Goriachev M.G., Dr. tech. sci., prof.;
Esaulov G.V., Dr. arch. sci., prof., member of the Academy of RAACS;
Ilichev V.A., Dr. tech. sci., prof., First Vice President of RAACS;
Kayumov R.A., Dr. phys-mat. sci., prof.;
Kichigin V.I., Dr. tech. sci., prof.;
Korolev E.V., Dr. tech. sci., prof.;
Kochev A.G, Dr. tech. sci., prof.;
Logachev K.I., Dr. tech. sci., prof.;
Mirsayapov Ilizar T., Dr. tech. sci., prof.;
Mirsayapov Ilshat T., Dr. tech. sci., prof.;
Strelkov A.K., Dr. tech. sci., prof.;
Stroganov V.F., Dr. chem. sci., prof., honorary m. of RAACS;
Suleimanov A.M., Dr. tech. sci., prof. corr.-m. AS RT;
Tunakova Iu.A., Dr. chem. sci., prof.;
Uglova E.V., Dr. tech. sci., prof.;
Khozin V.G., Dr. tech. sci., prof.;
Shagidullin R.R., Dr. chem. sci., corr.-m. AS RT;
Iakovlev G.I., Dr. tech. sci., prof.

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD:

Rolf Katzenbach, Dr. tech. sci., prof. (Germany);
Figovskiy O.L., Dr. tech. sci., prof., member of EAS, foreign member of RAACS (Israel);
Fischer H.-B., Dr.-Ing (Germany);
Hassan Abdalla, PhD, prof. (Great Britain);
Janotka I., Dr. tech. sci., head of unit (Slovakia).

THE FOUNDER AND THE PUBLISHER:
FSBEI of HE «Kazan State University of Architecture and Engineering»

The journal is included in the index of leading reviewed scientific journals and editions, defined by the Higher Attestation Commission, and recommended for publication of basic scientific results of dissertations on scientific degree of the doctor and the candidate of sciences. The articles are reviewed. Reproduction without the permission of editors is prohibited; citing references to the journal are obligatory.

It is registered by the Federal service for supervision of communications, information technology, and mass media (the certificate on registration PI № FS77-77410, dated December, 17th, 2019). It is included in the digital catalogue of JSC «RUSSIAN POST»; subscription number PP890. It is included in the subscription catalog of the Ural Press Group of Companies; subscription number 36939.

EDITORIAL ADDRESS:
420043, Kazan, Zelenaya 1, office 79
Tel. (843) 510-46-39
E-mail: patent@kgasu.ru Web-site: http://izvestija.kgasu.ru

© News Kazan State University of Architecture and Engineering, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ	
Мирсаяпов Илизар Т., Айсин Н.Н. Оценка влияния устройства глубокого котлована на дополнительные осадки зданий окружающей застройки	6
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ	
Мирсаяпов Илизар Т. Расчет прочности железобетонных шпал с учетом совместного деформирования с грунтовым основанием	14
Хайдаров Л.И., Каюмов Р.А., Шмелев Г.Н., Гимазетдинов А.Р. Продольный изгиб сжатого упругого стержня с одинаковыми нелинейными поворотными закреплениями на концах с учётом начальной кривизны	23
Кирсанов М.Н. Аналитический расчет прогибов плоской внешне статически неопределимой фермы	36
Петров А.С., Юзмухаметов А.М., Иванцов А.И. К вопросу оценки переувлажнения конструкций в местах теплотехнических неоднородностей	45
Мирсаяпов Ильшат Т., Гиматдинов И.М. Исследование напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных балок с частичной заделкой двутавровых сечений в бетоне	56
СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ	
Рахимов Р.З. Топливно-энергетический комплекс, экология и минеральные вяжущие вещества	67
Хантимиров А.Г., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К., Хозин В.Г. Древесно-полимерные композиты на основе поливинилхлорида, усиленные базальтовой фиброй	75
Хузиахметова К.Р., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К., Потапова Л.И. Структура смесей полимеров на основе поливинилхлорида	82
Смирнов Д.С., Ягунд Э.М., Броднева В.Е., Хасанов А.Ш. Материал дорожного покрытия на основе битумно-резинового вяжущего	90
Вдовин Е.А., Буланов П.Е., Журавлев И.В. Влияние целлюлозных стабилизирующих добавок на физико-механические характеристики битума	103
СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Гумеров А.В. Определение коэффициентов сил, действующих на прямоугольную призму в плоскопараллельном потоке методом дискретных вихрей	110
ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО, ПЛАНИРОВКА СЕЛЬСКИХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ	
Дембич А.А., Балтусова О.А. Исторический центр Казани - между преобразованием и сохранением	119
Закирова Ю.А., Сагдиев А.Р. Особенности градостроительного развития поселений городского типа в структуре Казанской агломерации	130
ТЕОРИЯ И ИСТОРИЯ АРХИТЕКТУРЫ, РЕСТАВРАЦИЯ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСТОРИКО-АРХИТЕКТУРНОГО НАСЛЕДИЯ	
Минибаева А.Р., Фазлеев М. Ш. Архитектура зрелищных сооружений в исторических садах Казани на период второй половины XIX – начала XX вв.	147
Правила представления материалов для публикации в научном журнале «Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета»	158

CONTENTS

GROUNDS AND FOUNDATIONS, UNDERGROUND FACILITIES	
Mirsayapov Ilizar T., Aysin N.N Assessment of the deep excavation effect on additional settlement of surrounding buildings.	6
BUILDING STRUCTURES, HOUSES	
Mirsayapov Ilizar T. Calculation of the strength of reinforced concrete sleepers, taking into account the joint deformation with the ground base	14
Khaidarov L. I., Kayumov R. A., Shmelev G. N., Gimazetdinov A. R. Buckling of a concentrically loaded imperfect elastic column with identical nonlinear rotational connections	23
Kirsanov M.N. Analytical calculation of deflections of a flat outwardly statically indeterminate truss	36
Petrov A.S., Juzmuhametov A. M., IvantsovA. I. Assessing overmoistening of structures in places of heat engineering inhomogeneities	45
Mirsayapov Ilshat T. , Gimatdinov I.M. Study of the stress-strain state of steel-reinforced concrete beams with partial embedding of I-sections in concrete	56
BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS	
Rakhimov R.Z. Fuel and energy complex, ecology and mineral binders	67
Khantimirov A.G., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K, Khozin V.G. Wood-polymer composites based on polyvinyl chloride reinforced with basalt fiber	75
Khuziakhmetova K.R., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K., Potapova L.I. Structure of polymer mixtures based on polyvinyl chloride	82
Smirnov D.S., Yagund E.M., Brodneva V.E., Khasanov A.Sh. Pavement material based on bitumen-rubber binder	90
Vdovin E.A., Bulanov P.E., Zhuravlev I.V. The effect of cellulose stabilizing additives on the physical and mechanical characteristics of bitumen	103
CONSTRUCTION MECHANICS	
Gumerov A.V. Determination of the coefficients of forces acting on a rectangular prism in a two-dimensional flow by the method of discrete vortices	110
URBAN PLANNING, RURAL PLANNING	
Dembich A.A., Baltusova O.A. The historical center of Kazan - between transformation and preservation	119
Zakirova Y.A. , Sagdiev A.R. Features of urban development of urban-type settlements in the structure of the Kazan agglomeration	130
ARCHITECTURE THEORY AND HISTORY. HISTORICAL AND ARCHITECTURAL HERITAGE RESTORATION AND RECONSTRUCTION	
Minibaeva A.R., Fazleev M.Sh. Architecture of spectacular buildings in the historical gardens of Kazan for the period of the second half of the XIX – early XX centuries	147
Rules of representation of materials for the publication in scientific journal «Kazan State University of Architecture and Engineering news»	158

УДК: 624.152
DOI: 10.52409/20731523_2022_3_6
EDN: ESCYYW

Оценка влияния устройства глубокого котлована на дополнительные осадки зданий окружающей застройки

Илизар Т. Мирсаяпов[1], Н.Н. Айсин[1]
[1]Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* В условиях плотной городской застройки проектирование и строительство новых объектов все чаще осуществляется в непосредственной близости к существующим зданиям, что требует разработки модели для расчета деформаций оснований зданий в единой системе с фундаментами, основанием и окружающим грунтом.
Целью данной работы являлась оценка влияния устройства котлована глубиной 13 м без крепления стенок рядом с существующим зданием на осадки основания. Для этого необходимо было оценить характер влияния устройства глубокого котлована на существующее здание и разработать расчетную модель для определения деформаций основания здания с учетом совместного деформирования системы «надземная и подземная части здания – фундамент – грунтовое основание».
Результаты: Комплексное моделирование напряженно-деформированного состояния и выполненные численные исследования позволили установить, что устройство глубокого котлована привело к одновременному вертикальному и горизонтальному перемещению грунтов основания фундаментов здания 30.1 мм и 19.8 мм соответственно. Возникло множество линий сдвига грунтового массива под фундаментами, свидетельствующих о достижении первого предельного состояния оснований фундаментов. Устройство глубокого котлована привело к чрезмерному и дополнительному деформированию фундаментов, крену фундаментов и здания в целом, а так же к усилиям в конструкциях выше предельно допустимых.
Выводы: Значимость разработанной модели основания для строительной отрасли состоит в том, что она позволяет определять осадку оснований фундаментов с учетом режимов нагружения.

Ключевые слова: осадка основания, глубокий котлован, окружающая застройка, режим нагружения, расчетная модель.

Для цитирования: Мирсаяпов Илизар Т., Айсин Н.Н. Оценка влияния устройства глубокого котлована на дополнительные осадки зданий окружающей застройки // Известия КГАСУ. 2022. № 3 (61), с.6-13, DOI:10.52409/20731523_2022_3_6,
EDN: ESCYYW

Assessment of the deep excavation effect on additional settlement of surrounding buildings

Ilizar T. Mirsayapov[1], N.N. Aysin[1]
[1]Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement*: In restrained urban conditions the design and construction of new facilities is increasingly carried out in close proximity to existing buildings, which requires the development of a model for calculating the deformations of building foundations in a single system with foundations, basement and surrounding soil.
The purpose of this work was to assess the impact of the excavation of a pit with a depth of 13 m next to an existing building without a protective fence. To do this, it is necessary to assess the influence of the deep excavation on the existing building and develop a calculation model for determining the deformations of the building foundation considering joint deformation in the system of superstructure and substructure - foundations - subgrade.
Results: Complex modeling of the stress-strain state and numerical studies have made it possible to establish that the construction of a deep excavation led to simultaneous vertical and horizontal movement of the soils of the building foundation base 30.1 mm and 19.8 mm, respectively. There were a lot of shifting lines of the soil mass under the foundations, indicating the achievement of the first limit state of the foundations bases. The construction of a deep excavation led to excessive and additional deformation of the foundations, the tilt of the foundations and the building as a whole, as well as to the stress in the structures above the maximum permissible.
Conclusions: The significance of the developed foundation model for the construction industry lies in the fact that it allows you to determine foundations settlement, taking into account the loading modes.
.

Keywords: foundation settlement, deep pit, surrounding buildings, loading mode, design model.

For citation: Mirsayapov Ilizar T., Aysin N.N Assessment of the deep excavation effect on additional settlement of surrounding buildings.// News KSUAE, 2022 №3 (61), p.6-13, DOI:10.52409/20731523_2022_3_6, EDN: ESCYYW

1. Введение

В связи с ростом плотности застройки городов все чаще происходит проектирование и строительство объектов настолько близко к существующим зданиям, что без специальных мероприятий по защите существующей застройки проводить работы становится невозможным, либо опасным [1-3]. Необходимо наблюдать, а также верно прогнозировать изменение технического состояния зданий, попадающих в зону влияния строительства или реконструкции, для этого составляется специальная программа по геотехническому мониторингу. При прогнозе технического состояния необходимо учитывать изменение распределения усилий в конструктивных элементах здания вследствие дополнительных (технологических и силовых) осадок фундаментов [4-7], для этого необходимо верно моделировать работу грунтового основания. Для точного прогноза картины деформирования основания модель основания должна учитывать изменения напряженно-деформированного состояния массива грунта под зданием, а также режим нагружения основания [8-11] (время, скорость нагружения, разгрузку, изменение направления действия суммарного напряжения).

В зависимости от категории технического состояния существующих зданий допустимые дополнительные осадки зданий составляют 20-50 мм.

В связи с этим возникает необходимость ограничения вертикального и горизонтального перемещения грунтов основания фундаментов существующих зданий. Для ограничения вертикальных и горизонтальных перемещений грунта оснований за пределами котлована устраиваются различные варианты ограждения котлованов. Эти

вопросы рассмотрены в работах [12-15]. Целью данной работы является оценка влияния устройства котлована глубиной 13 м без крепления стенок рядом с существующим зданием на дополнительные осадки основания. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Оценить характер влияния устройства глубокого котлована на существующее здание.
2. Разработать расчетную модель для расчета деформаций основания здания в системе с фундаментами, основанием и окружающим грунтом.

2. Материалы и методы

Исследуемое здание трехэтажное с неполным каркасом из сборного железобетона, с подвальным этажом и с двумя пристроями, расположено в осях 9-15/A-G, имеет размеры в плане 36х36 м.

Фундаменты основной части здания столбчатые с размером подошвы 2.0х2.0 м, . глубиной заложения - 4.15 м, под несущими стенами – сборные железобетонные ленточные.

Согласно результатам изысканий, в геологическом строении участка (на вскрытую скважинами глубину) принимают участие аллювиально-делювиальные четвертичные отложения и верхнепермские элювиальные отложения, перекрытые с поверхности толщей техногенных отложений четвертичного возраста.

С поверхности до изученной глубины 25.0 м геолого-литологическое строение представлено следующими инженерно-геологическими элементами (ИГЭ):

ИГЭ-1. Насыпной грунт, состоящий из смеси чернозема, щебня, песка и гравия. Залегает с поверхности до глубины 0.2-1.1м.

ИГЭ-2. Суглинок твердый, коричневый, легкий, среднедеформируемый, низкой прочности, ненабухающий, водонепроницаемый, незасоленный, быстро и очень быстро размокаемый, известковистый, мощностью от 9.3 до 13.1 м. Залегает в интервале глубин 0.4-14.3 м.

ИГЭ-3. Суглинок тугопластичный, коричневый, тяжелый, среднедеформируемый, низкой прочности, ненабухающий, водонепроницаемый, незасоленный, быстро и очень быстро размокаемый, известковистый, с прослоями и гнездами песка, мощностью от 1.3 до 4,5 м. Залегает в интервале глубин 9.7-17.4 м.

ИГЭ-4. Глина верхнепермская, элювиальная, твердая, красновато-коричневая, комковатая, трещиноватая, легкая, среднедеформируемая, средней прочности, ненабухающая, водонепроницаемая, незасоленная, медленно и быстро размокаемая, известковистая, с тонкими прослойками алевролита, мощностью от 3.4 до 7.2 м. Залегает в интервале глубин 17.0-25.0 м.

ИГЭ-5. Песчаник верхнепермский, элювиальный, желтовато-коричневый, низкой прочности, водопроницаемый, сильновыветрелый, размягчаемый, сильнопористый, водонасыщенный, мощностью от 2.8 до 4.5 м. Залегает в интервале глубин 14.0-20.9 м.

В целом геолого-литологическое строение площадки характеризуется относительной выдержанностью грунтов по площади и глубине, неоднородностью их состава и состояния. Физико-механические характеристики грунтов оснований фундаментов приведены в таблице.

Таблица

Физико-механические характеристики грунтов

№ ИГЭ	Плотность при природной влажности, т/м^3	Коэффициент пористости	Модуль деформации, МПа	Угол внутреннего трения при α=0,95, град	Удельное сцепление расчетное при α=0,95, кПа
	ρ	**e**	**E**	**φ**	**C**
2	1.91	0.76	15.1	21	32
3	1.88	0.842	13.1	19	25
4	1.88	0.857	25.2	21	46
5	1.91	0.617	37.8	35	0

Расчет напряжений и деформаций грунтового основания фундаментов здания производился с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР 2014, реализующего метод конечных элементов в перемещениях. Для расчетов было создано два типа расчетных моделей: трехмерная и плоская. Вертикальные несущие элементы здания (железобетонные колонны) и горизонтальные несущие элементы (железобетонные ригели) моделировались стрежневыми элементами. Для моделирования плит перекрытий в трехмерной модели использовались конечные элементы оболочки, при расчетах в плоской постановке плиты перекрытия моделировались стержневыми конечными элементами. Для полноценной оценки напряженно-деформированного состояния всего здания в целом, а также отдельных элементов моделировалась система «грунтовое основание – фундамент – надземная часть здания». Работа грунта учитывалась через коэффициенты постели C_1 и C_2. Расчет жесткостей этих элементов рассчитывалась в зависимости от расположения, напряженно-деформированного состояния основания и режимов нагружения по модифицированному методу Пастернака:

$$C_1 = \frac{E_1(t,\tau)}{H_C(1-2\mu_{gr})}, \tag{1}$$

$$C_2 = \frac{E_1(t,\tau)}{\sigma(1+\mu_{gr})}, \tag{2}$$

где H_C – глубина сжимаемой толщи;
μ_{gr} – коэффициент Пуассона грунта;
$E_1(t, \tau)$ – модуль общих деформаций грунта основания с учетом изменения по глубине сжимаемой толщи и режимов нагружения:

$$E_1(t,\tau) = \frac{H_C}{\sum_{i=1}^{n} \frac{h_i}{u_i E_{1i}(t,\tau)}}, \tag{3}$$

где h_i – толщина i-го слоя грунта;
u_i – поправочный коэффициент модуля деформаций для i-го слоя грунта;
$E_{1i}(t, \tau)$ – модуль общих деформаций грунта на каждом i-том слое с учетом изменения режимов нагружения вычисляется по формуле:

$$E_{1i}(t,\tau) = \frac{\Delta\sigma_{1i}(t,\tau)}{\Delta\varepsilon_{1i}(t,\tau)}, \tag{4}$$

где $\Delta\sigma_{1i}(t,\tau)$, $\Delta\varepsilon_{1i}(t,\tau)$ – приращения вертикальных напряжений и деформаций при трехосном режимном нагружении, принимается в соответствии с [16].

3. Результаты и обсуждение

В соответствии с общей концепцией реконструкции в непосредственной близости от здания, на расстоянии 4 м продольных и поперечных стен запроектирована и устроена подземная парковка в глубоком котловане с глубиной 13-15 м без крепления стенок.

До устройства глубокого котлована вдоль осей А, 9 и 15 внешние признаки чрезмерных и неравномерных осадок оснований фундаментов не установлены. Техническое состояние оснований фундаментов, фундаментов, несущих элементов каркаса и здания в целом оценивается как работоспособное.

Устройство глубокого котлована с глубиной 13 м с вертикальными стенками без надлежащего крепления в непосредственной близости от здания со стороны осей А, 9 и 15 (со стороны оси А котлован вплотную подходит к стене здания) вызвало горизонтальное перемещение грунтов основания фундаментов. Появились признаки деформаций железобетонного каркаса здания между осями А-В вследствие

дополнительной осадки основания фундаментов колонн каркаса здания из-за горизонтального перемещения стенок глубокого котлована, что привело к одновременному вертикальному и горизонтальному перемещению грунтов за пределами глубокого котлована, т.е. основания фундаментов здания. В бетонном полу подвального этажа появилась трещина вдоль стены по оси А с шириной раскрытия до 6 мм на расстоянии 1 м от внутренней поверхности стены по оси А, при этом вертикальное перемещение пола в зоне стены составило около 20 мм. Также появились трещины с раскрытием до 1 мм в межплитных швах перекрытия подвала и вертикальные трещины с раскрытием до 0.5 мм в опорной зоне ригеля перекрытия подвала (между осями А-В). В дальнейшем эти дефекты получили большее развитие и появились другие дефекты, что свидетельствует о продолжении развития деформаций грунтового основания фундаментов здания. Техническое состояние оснований фундаментов и здания в данный момент является труднопрогнозируемым и требует проведения исследований с учетом развития дополнительных деформаций грунтов в котловане и за его пределами.

В связи с этим были проведены численные исследования напряженно-деформированного состояния грунтов основания фундаментов рассматриваемого здания с учетом влияния глубокого котлована и подземной парковки с использованием модифицированной расчетной модели Пастернака на основе аналитической расчетной модели грунта при трехосном режимном нагружении [16].

Комплексное моделирование напряженно-деформированного состояния и выполненные численные исследования позволили установить, что устройство глубокого котлована с глубиной 13.0 м с вертикальными стенками без надлежащего крепления в непосредственной близости от здания привело к одновременному вертикальному и горизонтальному перемещению грунтов основания фундаментов здания 30.1 мм и 19.8 мм соответственно. Осадки основания фундаментов составили 22 мм. Возникло множество линий сдвига грунтового массива под фундаментами (Рис. 1), свидетельствующих о достижении первого предельного состояния оснований фундаментов в осях А-В. Таким образом, устройство глубокого котлована привело к чрезмерному и дополнительному деформированию фундаментов, крену фундаментов и здания в целом. Относительная разность осадок оснований фундаментов:

$$-0.0021 > \left[\frac{\Delta S}{L}\right]_{ult} = 0.001\,, \tag{5}$$

где L – расстояние между рассматриваемыми точками;
ΔS – абсолютная разность осадок рассматриваемых точек.

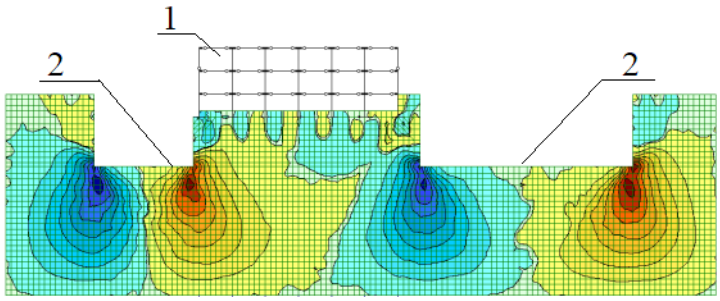


Рис. 1. Эпюра касательных напряжений в грунте основания (иллюстрация авторов). 1- каркас здания; 2 – глубокий котлован
Fig. 1. Plot of tangential stresses in the ground of the base (illustration by the authors), 1- building frame; 2 – deep pit

Дополнительные осадки основания фундаментов определяются по формуле:

$$S_{ad} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\sigma_1(t,\tau)}{E_{1i}(t,\tau)} h_i, \tag{6}$$

Возведение трехэтажной подземной парковки в глубоком котловане привело к дальнейшему ухудшению геотехнической ситуации:

− увеличились вертикальные и горизонтальные перемещения грунтов в основаниях фундаментов до 42.5 мм и 23.7 мм (рис. 2, 3);

− зона первого предельного состояния оснований фундаментов распространилась в осях A-D, 9-15;

− усилия в несущих элементах каркаса увеличились до 60%.

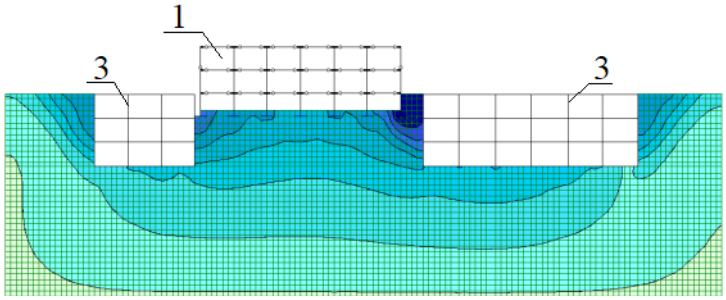


Рис. 2. Эпюра вертикальных перемещений грунтов основания здания (иллюстрация авторов): 1 – каркас здания; 3 – подземный паркинг

Fig. 2. Plot of vertical displacements of the foundation of the building (illustration by the authors): 1 – building frame; 3 – underground parking

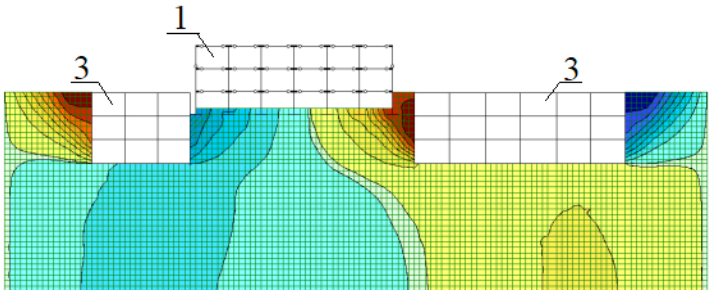


Рис. 3. Эпюра горизонтальных перемещений грунтов основания здания (иллюстрация авторов): 1 – каркас здания; 3 – подземный паркинг

Fig. 3. Plot of horizontal movements of the building foundation soils (illustration by the authors): 1 – building frame; 3 – underground parking

Результаты геотехнического мониторинга несущих конструкций каркаса, грунтовых оснований, междуэтажных перекрытий в течение 4-х месяцев подтвердили результаты численных исследований.

Установлено, что имевшиеся к моменту начала наблюдения дефекты получили дальнейшее развитие. Ширина раскрытия трещины в бетонном полу подвала вдоль стены по оси А увеличилась до 9 мм, трещины в межплитных швах перекрытия подвала образовывались в пределах всего подвального этажа и ширина раскрытия трещин увеличилась до 1.5 мм. Вертикальные трещины в ригелях перекрытия в зоне опирания на консоли колонны образовались на всех ригелях перекрытия подвального этажа и ширина раскрытия этих трещин увеличилась до 1.0 мм.

Кроме получивших развитие имеющихся дефектов, образовались и получили развитие новые дефекты и повреждения:

−в бетонном полу подвала на расстоянии 1.5 м от существующей трещины образовалась новая трещина с шириной раскрытия до 5 мм, затем другие трещины с шагом 1.5-2.5 м вдоль буквенных осей и с шагом 2.0-2.5 м вдоль цифровых осей с раскрытием до 3.0-4.5 мм;

−горизонтальные трещины с шириной раскрытия до 0.5-0.7 мм в зоне сопряжения закладных деталей консоли колонны и ригеля перекрытия подвального этажа;

−вертикальные трещины шириной раскрытия до 1.0-1.5 мм в стенах по осям 9 и 15 подвального и первого этажей, шаг трещин составляет 1.5-2.0 м.

Вышеописанное свидетельствует о продолжающихся чрезмерных дополнительных деформациях грунтового основания фундаментов и, как следствие, о дополнительных непроектных деформациях каркаса здания.

4. Заключение

1. Устройство глубокого котлована с глубиной 13 м с вертикальными стенками без надлежащего крепления в непосредственной близости от здания привело к чрезмерному и дополнительному деформированию фундаментов и крену здания в целом, к деформированной схеме работы каркаса, что отличается от проектной. Техническое состояние здания оценивается как аварийное.

2. Разработана расчетная модель здания с учетом совместного деформирования системы «надземная и подземная части здания – фундамент – грунтовое основание». Выполненные численные исследования на основе расчетной модели показали, что устройство глубокого котлована с глубиной 13 м привело к одновременному вертикальному и горизонтальному перемещению грунтов основания фундаментов здания. Возникло множество линий сдвига грунтового массива под фундаментами. Результаты геотехнического мониторинга в течение 4-х месяцев подтвердили результаты численных исследований.

Список литературы / References

1. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Long-term settlements assessment of high-rise building groundbase based on analytical ground deformation diagram // Procedia Engineering. 2016. P. 519-527. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.728.
2. Mirsayapov I. T. Koroleva I. V. Strength and Deformability of Clay Soil Under Different Triaxial Load Regimes that Consider Crack Formation // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2016. Vol. 53. No 1. P. 5-11. DOI 10.1007/s11204-016-9356-x.
3. Li Q., Liu M., Lu Z., Deng X. Creep Model of High-Strength High-Performance Concrete Under Cyclic Loading // J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed. 2019. №3 (34). P. 622–629. DOI: 10.1007/s11595-019-2096-9.
4. Chen P., Zhou X., Zheng W., Wang Y., Bao B. Influence of high sustained loads and longitudinal reinforcement on long-term deformation of reinforced concrete beams // J. Build. Eng. 2020. № 30. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101241.
5. Bouziadi F., Boulekbache B., Haddi A., Hamrat M., Djelal C. Finite element modeling of creep behavior of FRP-externally strengthened reinforced concrete beams // Eng. Struct. 2020. №204. P. 109908. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109908.
6. Koroleva I. V. Assessment of clay soils strengthening under triaxial cyclic loading // E3S Web of Conferences Volume 274 (2021): 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021), Kazan, 21–28 April 2021. France: EDP Sciences, 2021. Vol. 274. P. 3025. DOI 10.1051/e3sconf/202127403025.
7. Song L., Fan Z., Hou J. Experimental and Analytical Investigation of the Fatigue Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams // Int. J. Concr. Struct. Mater. 2019. №1(13). DOI: 10.1186/s40069-019-0340-5.
8. Zamaliev F. S., Zakirov M. A. Stress-strain state of a steel-reinforced concrete slab under long-term // Magazine of Civil Engineering. 2018. P. 12–23.
9. Tang H., Chen Z., Avinesh O., Guo H., Meng Z., Engler-Pinto C., Kang H. Notch Insensitivity in Fatigue Failure of Chopped Carbon Fiber Chip-Reinforced Composites Using Experimental and Computational Analysis // Compos. Struct. 2020. №10(16). P. 112280. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112280.
10. Choe G., Shinohara Y., Kim G., Lee S., Lee E., Nam J. Concrete corrosion cracking and transverse bar strain behavior in a reinforced concrete column under simulated marine conditions // Appl. Sci. 2020. №5(10). DOI:10.3390/app10051794.
11. Gambarelli S., Ožbolt J. Interaction between damage and time-dependent deformation of mortar in concrete: 3D FE study at meso-scale // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2019. № 615. P. 012013. DOI:10.1088/1757-899X/615/1/012013.
12. Augeard E., Ferrier E., Michel L. Mechanical behavior of timber-concrete composite members under cyclic loading and creep // Eng. Struct. 2020. №210. P. 110289. DOI:

10.1016/j.engstruct.2020.110289.
13. Trekin N. N. Kodysh E. N., Mamin A. N., Trekin D. N. Onana J. Improving methods of evaluating the crack resistance of concrete structures // American Concrete Institute, ACI Special Publication. 2018. № 326. P. 93.1–93.6.
14. Liang J., Nie X., Masud M., Li J., Mo Y. L. A study on the simulation method for fatigue damage behavior of reinforced concrete structures // Eng. Struct.2017. № 150, P. 25–38. DOI:10.1016/j.engstruct.2017.07.001
15. Zhang G., Zhang Y., Zhou Y. Fatigue Tests of Concrete Slabs Reinforced with Stainless Steel Bars // Adv. Mater. Sci. Eng. 2018. P. 1-5.
16. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Changes in physical and mechanical characteristics of soil under triaxial loading // Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations : Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations, GFAC 2019, Saint petersburg, 06–08 Febrary 2019. – Saint petersburg: Taylor & Francis Group, 2019. – P. 193-196. – DOI 10.1201/9780429058882-37.

Информация об авторах.

Илизар Талгатович Мирсаяпов, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: mirsayapov1@mail.ru
Нияз Наилович Айсин, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: zarejay@kgasu.ru

Information about the authors.

Ilizar T. Mirsayapov, Doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
E-mail: mirsayapov1@mail.ru
Niyaz N. Aysin, postgraduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
E-mail: zarejay@kgasu.ru

УДК: 624.012.35
DOI: 10.52409/20731523_2022_3_14
EDN: ZMWQUF

Расчет прочности железобетонных шпал с учетом совместного деформирования с грунтовым основанием

Илизар Т. Мирсаяпов[1]
[1]Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Железобетонные шпалы являются специальными конструкциями из-за сложной геометрии и повышенных требований к их трещиностойкости и выносливости. Необходимая трещиностойкость и выносливость обеспечиваются применением предварительно напряженной арматуры. Таким образом, совершенствование армирования железобетонных шпал и разработка методов их расчета является актуальной задачей. Цель исследования - на основе теоретических исследований разработать методы расчета выносливости и трещиностойкости железобетонных шпал с предварительно напряженной стержневой арматурой.
Результаты. Разработаны новые методы расчета выносливости и трещиностойкости железобетонных шпал с предварительно напряженной арматурой.
Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в том, что предложенные методы позволяют более точно оценивать выносливость и трещиностойкость железобетонных шпал с предварительно напряженной арматурой.

Ключевые слова: напряженная арматура, трещиностойкость, выносливость, железобетонные шпалы, ползучесть бетона, щебеночное основание.

Для цитирования: Мирсаяпов Илизар Т. Расчет прочности железобетонных шпал с учетом совместного деформирования с грунтовым основанием // Известия КГАСУ 2022 № 3 (61),с.14-22, DOI:10.52409/20731523_2022_3_14, EDN: ZMWQUF

Calculation of the strength of reinforced concrete sleepers taking into account the joint deformation with the ground base

Ilizar T. Mirsayapov[1]
[1]Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract: Problem statement. Reinforced concrete sleepers are special structures due to complex geometry and increased requirements for their crack resistance and endurance. The necessary crack resistance and endurance is provided by the use of prestressed reinforcement. The purpose of the study is to develop methods for calculating the endurance and crack resistance of reinforced concrete sleepers with prestressed core reinforcement on the basis of theoretical studies.
Results. New methods for calculating the endurance and crack resistance of reinforced concrete sleepers with prestressed reinforcement have been developed.
Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry lies in the fact that they make it possible to more accurately assess the endurance and crack resistance of reinforced concrete sleepers with prestressed reinforcement.

Keywords: stressed reinforcement, crack resistance, endurance, reinforced concrete sleepers, creep of concrete.

For citation: Mirsayapov Ilizar T. Calculation of the strength of reinforced concrete sleepers, taking into account the joint deformation with the ground base // News KSUAE 2022. № 3 (61) p.14-22, DOI:10.52409/20731523_2022_3_14, EDN: ZMWQUF

1. Введение

В настоящее время железобетонные шпалы являются массовыми, оставаясь одновременно и специальными конструкциями из-за сложной геометрии, а также из-за повышенных требований к их трещиностойкости и выносливости [1]. Необходимая трещиностойкость и выносливость обеспечиваются применением предварительно напряженной арматуры из высокопрочной арматурной проволоки класса B_p1400. Однако технология их изготовления сложна, многоступенчата и трудоемка. Поэтому совершенствование армирования железобетонных шпал с целью повышения технологичности изготовления и снижения трудозатрат является актуальной задачей [2-4].

Одним из путей снижения трудозатрат и повышения технологичности является замена проволочной арматуры шпал на высокопрочную стрежневую арматуру [5-8].

Опытная конструкция железобетонных шпал с высокопрочной стержневой арматурой разработана для железнодорожных путей с рельсовой колеей шириной 1520 мм и рельсами типов Р75, Р65 и Р50, по которым обращается типовой подвижной состав общей сети железных дорог России. Форма и размеры шпал приняты в соответствии с ГОСТ 10629-88 «Шпалы железобетонные предварительно напряженные для дорог колеи 1520 мм. Технические условия». Шпалы изготовляются из тяжелого бетона класса В40 по прочности на сжатие. Передаточная прочность принимается равной 30 МПа [9-11].

В связи с вышеуказанным, целью данной работы является разработка методов расчета выносливости и трещиностойкости железобетонных шпал с предварительно напряженной арматурой. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методику расчета выносливости;
2. Разработать методику расчета трещиностойкости.

2. Материалы и методы

Армирование шпал осуществляется четырьмя стержнями диаметром 10 мм из арматуры класса А600 или четырьмя стержнями диаметром 12 мм из арматуры класса А500. Величина предварительного напряжения арматуры принимается равной 0,9 и 0,95 ее нормативного сопротивления. Расчет шпал производится по 1-й группе предельных состояний на прочность и на выносливость [12].

Для расчета на прочность принимается средняя величина вертикальной нагрузки $P_{ср}$=5500 кГс и среднее квадратичное отклонение этой нагрузки σ=2700 кГс. При расчете на выносливость принимается средняя величина максимальной многократно повторяющейся вертикальной нагрузки, соответствующая тяжелому режиму эксплуатации, $P_{срцикл}$=4470 кгс и среднее квадратичное отклонение этой нагрузки σ=2135 кГс. Коэффициент асимметрии цикла нагружения $p=P_{мин}/P_{макс}$ принимается равным нулю. Расчетная нагрузка определяется по формуле $P_{расч.i}= P_{ср}:i+2,5\ \sigma_i$ и с учетом коэффициента 1,2 , учитывающего влияние криволинейного участка пути [13].

Шпала рассчитывается как балка на упругом основании, лежащая на щебеночной подготовке толщиной 300 мм, с коэффициентом постели, равным 15 кг/см^3, при этом для расчета прочности учитывается длина опирания, равная 0,85 м от каждого края шпалы, а при расчете выносливости учитывается опирание по всей длине шпалы [14, 15].

Расчетная схема шпалы при расчете на прочность и выносливость принимается в виде стержня, загруженного двумя симметрично расположенными вертикальными силами $P_{расч}$ и $P_{расч:пов,}$ на расстоянии 0,55 м от края шпалы и равномерно распределенными по грузовой площадке длиной 0,3 м (рис. 1).

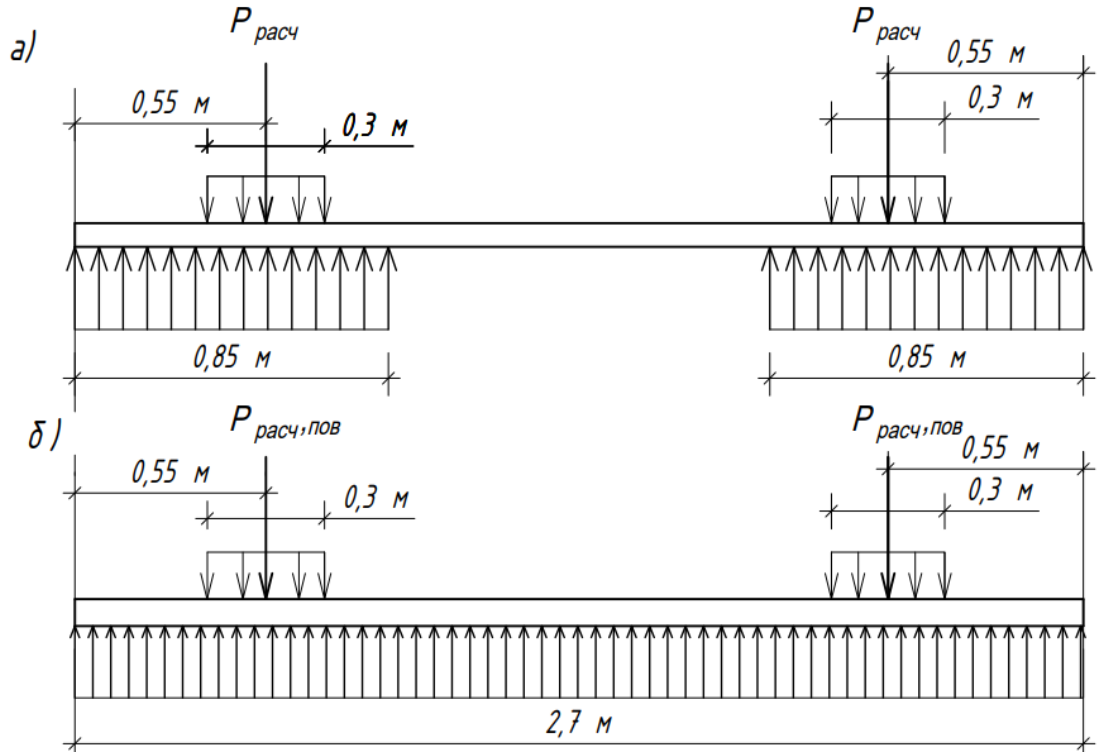


Рис. 1. Расчетные схемы шпалы при расчете: а) на прочность; б) на выносливость (иллюстрация автора)

Fig. 1. Calculation schemes of sleepers when calculating: a) strength; b) endurance (illustration by the author)

Расчет шпал на прочность и на выносливость производится с учетом сопротивления бетона растянутой зоны (без трещин) согласно расчетной модели, принятой в СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».

Для сравнения выполнены также расчеты прочности и выносливости без учета сопротивления бетона растянутой зоны по обеим методикам. Расчетными являются подрельсовое и среднее сечение шпалы (таблица 1).

Расчет прочности нормальных сечений без учета сопротивления бетона растянутой зоны по методике СП 63.13330.2018. При расчете прочности, как в среднем, так и в подрельсовом сечениях, растянутая зона находится в нижней части шпалы.

Таблица 1

Параметры рассматриваемых вариантов

Вариант1	Вариант2	Вариант3
4Ø10 Ат 500	4Ø12 Ат 600	4Ø12 Ат 600
h1=40 mm	h1=40 mm	h1=40 mm
h2=115 mm	h2=115 mm	h2=115 mm
σ_{spo}=0,95$R_{s,ser}$	σ_{spo}=0,95$R_{s,ser}$	σ_{spo}=0,90$R_{s,ser}$

Изгибающие моменты от внешней нагрузки

Среднее сечение	Подрельсовое сечение
M=0,97 тс. м	M=1,45 тс. м
M_{max}=0,725 тс. м	M_{max}=1,14 тс. м

Несущая способность рассматриваемого нормального сечения шпалы вычисляется по формуле:

$$M_{ult} = R_b S_b + \sigma_{sc} A'_{sp} Z_s \quad (1)$$

где S_b- статический момент сжатой зоны бетона в виде трапеции относительно центра тяжести растянутой арматуры:

$$Z_s = h_o - a'_s \; ; \sigma_{sc} = 400 - \sigma'_{sp2}; \sigma'_{sp2} = \sigma_{spo} - \sigma'_{slos}$$

Расчет прочности и выносливости нормальных сечений шпал с учетом сопротивления бетона растянутой зоны по методике СНиП 2.03.01-84. При расчете на выносливость в подрельсовом сечении растяжение по нижней грани шпалы, а в среднем сечении по верхней грани. Расчет по обоим сечениям производится по единой методике.

Условие прочности нормального сечения при статическом нагружении имеет вид:

$$\mathrm{M}_i \le \mathrm{M}_{crc,i} \quad (2)$$

где M_i – изгибающий момент в рассматриваемом сечении от действия внешней статической нагрузки;

$M_{crc,i}$ – момент трещинообразования при статическом нагружении.

Момент трещинообразования при многократно повторяющемся циклическом нагружении определяется с учетом того, что предельный момент равняется моменту трещинообразования. Также следует учесть несовпадение растянутых зон для среднего сечения при статических и многократно повторяющихся циклических нагружениях.

Момент образования нормальных трещин при циклическом нагружении определяется по формуле:

$$M'_{crc} = \gamma_{b1} R_{bt,ser} \frac{I'_{red}}{y} + P_{02}\left(e_{op2} + \frac{I'_{red}}{yA_{red}}\right) \quad (3)$$

где γ_{b1} – коэффициент условий работы бетона, затем проверяем условие:

$$\mathrm{M}_{imax} \le M'_{crc} \quad (4)$$

где M_{imax} – изгибающий момент в рассматриваемом сечении от максимальной нагрузки цикла. Если условие (4) выполняется, определяется предельная несущая способность по бетону сжатой зоны и растянутой арматуре, учитывая полное приведенное сечение ($\alpha' = E_s/E_{b,rep}$).

$$M'_b = \gamma_{b1} R_{bt,ser} \frac{I_{red}}{h - y_0} + P_{02}\left(e_{op2} + \frac{I_{red}}{yA_{red}}\right) \quad (5)$$

$$M'_s = \frac{1}{\alpha'}\left(R_s\gamma_{s3} - \sigma_{sp2} + \alpha'\sigma_{bps}\right)\frac{I'_{red}}{y_{sp}} \quad (6)$$

где γ_{b1}, γ_{s3} – коэффициенты условий работы бетона сжатой зоны и продольной арматуры, принимаются в зависимости от p_b и p_s соответственно:

$$P_b = \frac{\sigma_b^{min}}{\sigma_b^{max}};\ P_s = \frac{\sigma_s^{min}}{\sigma_s^{max}}$$

σ_b^{min}, σ_b^{max} – минимальные и максимальные напряжения цикла в бетоне сжатой зоны; σ_s^{min}, σ_s^{max} – то же, в растянутой арматуре.

Выносливость конструкции по нормальному сечению будет обеспечена, если выполняются условия:

$$\mathrm{M}_{imax} \le M'_{crc} \quad (7)$$

$$\mathrm{M}_{imax} \le M'_b \quad (8)$$

$$\mathrm{M}_{imax} \le M'_s \quad (9)$$

Расчет выносливости нормальных сечений шпал без учета растянутого бетона выполняется по методике СП 63.13330.2018. Если в растянутой зоне образуются трещины, расчет выносливости производится без учета растянутого бетона.

Относительная высота сжатой зоны в этом случае определяется методом Ньютона путем последовательных приближений.

$$\xi = \xi_0 - \frac{f(\xi)}{f'(\xi)} \quad (10)$$

ξ_0 – первоначально задаваемое значение ξ;

$$f(\xi) = \xi^3 - a\xi^2 + b\xi + c \quad (11)$$

$f'(\xi)$ – первая производная функция $f(\xi)$; a, b, c- параметры сечения и нагрузки.

Характеристики приведенного сечения определяются без учета растянутого бетона.

Предельная несущая способность по бетону сжатой зоны и по продольной арматуре вычисляется соответственно по формулам (5) и (6) путем постановки характеристик приведенного сечения без учета растянутого бетона.

Выносливость по нормальному сечению будет обеспечена, если выполняются условия (8) и (9).

Расчет прочности и выносливости нормальных сечений шпал по методике СП 63.13330.2018. Расчет производится, исходя из уравнений продольных сил и моментов (рис. 2, 3).

$$N_b = N_s + N_{bt} + N_s' \quad (12)$$

$$M_{ult} = N_b Z_1 + N_{bt} Z_2 + N_s Z_3 + N_s' Z_4 \quad (13)$$

Гипотезы плоских сечений и диаграмм состояния бетона и арматуры (рис. 3, 4):

$$\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_s} = \frac{x}{h_0 - x} \quad (14)$$

где N_b – равнодействующая усилий в бетоне сжатой зоны;
N_{bt} – равнодействующая усилий в бетоне растянутой зоны;
N_s – равнодействующая усилий в напрягаемой арматуре, расположенной в растянутой зоне;
N_s' – равнодействующая усилий в напрягаемой арматуре, расположенной в сжатой зоне.

Несущая способность, а также выносливость шпалы вычисляются, принимая за достижение предельного состояния образование нормальных трещин в растянутой грани.

При этом принимается, что в растянутой грани деформации бетона равняются деформациям растяжения, т.е. $\varepsilon_{bt}=\varepsilon_{btu}$.

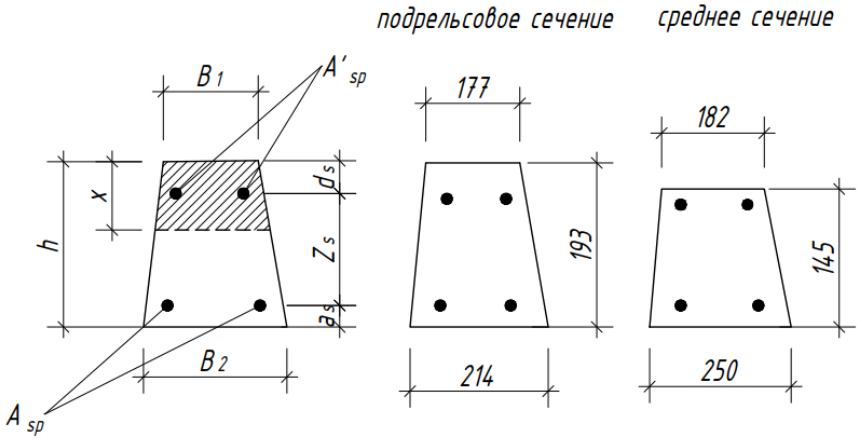


Рис. 2. Поперечное сечение шпалы (иллюстрация автора)
Fig. 2. Cross section of sleepers (illustration by the author)

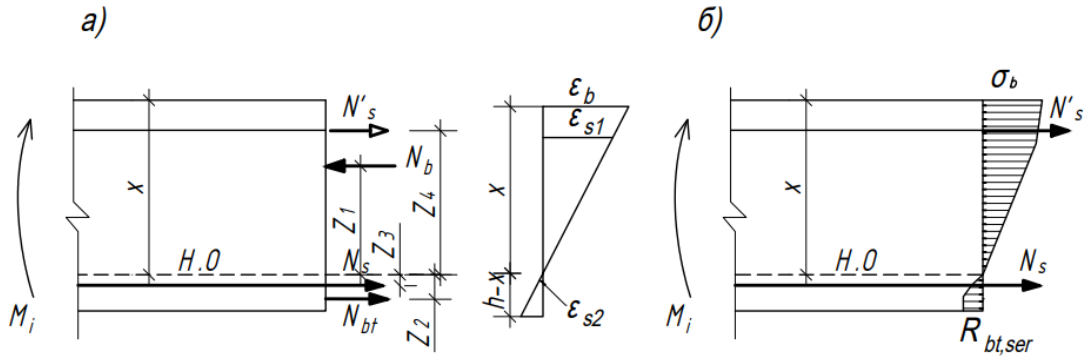


Рис. 3 а) схема усилий и эпюра деформаций в нормальном сечении шпалы; б) эпюры напряжений в бетоне при расчете на прочность и на выносливость по нормальному сечению арматуры (иллюстрация автора).
Fig. 3. a) a diagram of forces and a diagram of deformations in the normal cross-section of the sleeper; b) stress diagrams in concrete when calculating strength and endurance over the normal cross-section of the reinforcement (illustration by the author)

3. Результаты и обсуждение

Исходя из гипотезы плоских сечений и зависимостей «σ_b-ε_b» и «σ_s-ε_s» по соответствующим деформациям определяются напряжения в бетоне и арматуре. По напряжениям в бетоне σ_b и напряжениям σ_s определяется момент, воспринимаемый сечением, соответствующий принятой величине краевых деформаций бетона $\varepsilon_{bt}=\varepsilon_{btu}$.

$$M_{crc} = N_b Z_1 + N_{bt} Z_2 + N_s Z_3 + N_s^{'} Z_4 \quad (15)$$

Проверка прочности и выносливости производится из условий:

$$M_i \le M_{crc}$$
$$M_{imax} \le M_{crc}^{'} \quad (16)$$

где M_i – изгибающий момент в расчетных сечениях при расчетных нагрузках $P_{расч}$;
M_{crc} – момент, воспринимаемый сечением, соответствующий принятой величине краевых деформаций бетона $\varepsilon_{bt}=\varepsilon_{btu}$, по полученной высоте сжатой зоны бетона x и вычисляемый в соответствие с диаграммами состояния материалов «σ_b-ε_b» и «σ_s-ε_s» при кратковременном статическом нагружении (рис. 4);
M_{imax} – изгибающий момент в расчетных сечениях при расчетных нагрузках $p^{max}_{расч.цикл}$;
M'_{crc} — момент, воспринимаемый сечением, соответствующий принятой величине краевых деформаций бетона $\varepsilon_{bt}=\varepsilon_{btu}$, по полученной высоте сжатой зоны бетона x и вычисляемый в соответствие с диаграммами состояния материалов «σ_b-ε_b» и «σ_s-ε_s» при многократно повторяющемся циклическом нагружении (рис. 5).

Пределы выносливости бетона и арматуры, используемые в диаграммах состояния материалов, вычисляются по формулам (17, 18):

Для бетона:

$$R_{b,rep} = R_b \left[k_g - \frac{\log N}{7}\left(k_g - \frac{0,5}{1-0,616p_b}\right)\right], \quad (17)$$

Для арматуры:

$$R_{s,rep} = R_b \left[\eta - \frac{\log N}{6,3}\left(\eta - k_{ps}\right)\right] \quad (18)$$

Модуль деформации бетона при многократно повторяющемся циклическом нагружении вычисляется по формуле:

$$E_{b,rep} = \frac{E_b}{1+\varphi(t)_{rep}}; \quad (19)$$

где $\varphi_{(t)rep}$ – характеристика линейной части деформаций виброползучести, вычисляется по формуле $\varphi(t)_{rep} = E_b C_l^{'}(t,\tau)$; здесь $C_l^{'}(t,\tau)$ – мера линейной части деформаций виброползучести.

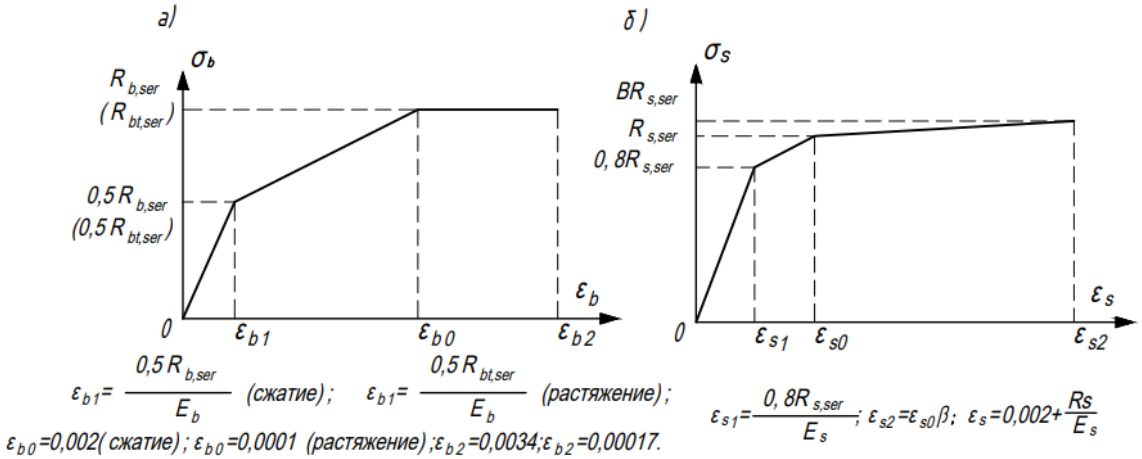


Рис. 4. а) диаграмма состояния бетона при кратковременном статическом нагружении; б) диаграмма состояния арматуры при кратковременном статическом нагружении
(иллюстрация автора)
Fig. 4. a) diagram of the state of concrete under short-term static loading; b) diagram of the state of reinforcement under short-term static loading
(illustration by the author)

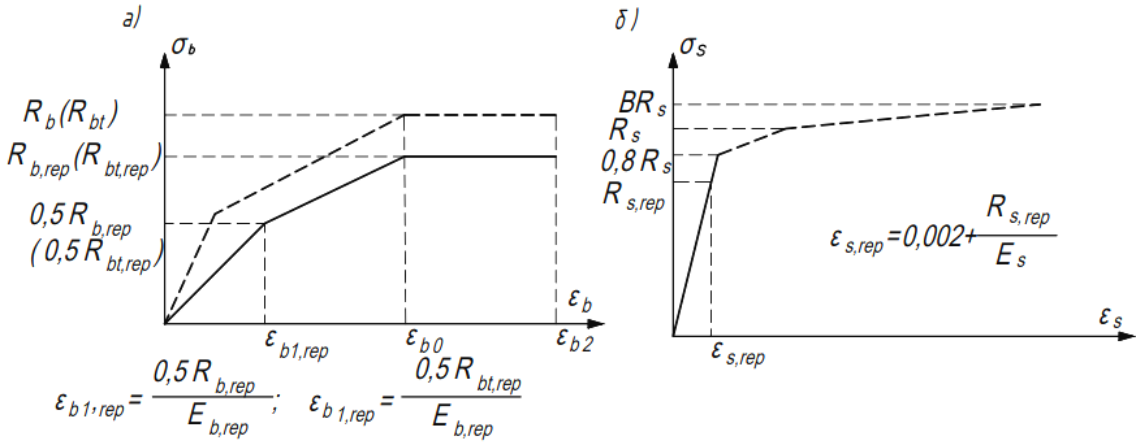


Рис. 5. а) диаграмма состояния бетона при многократно циклическом нагружении; б) диаграмма состояния арматуры при многократно повторяющемся циклическом нагружении (иллюстрация автора)

Fig. 5. a) diagram of the state of concrete under repeated cyclic loading; b) a diagram of the state of reinforcement under repeated cyclic loading (illustration by the author)

Выносливость, как в среднем, так и в подрельсовом сечениях шпалы будет обеспечена, если выполняется условие:

$$\sigma_{mt}^{max} \leq \gamma_{b4} R_{bt,ser} \gamma_{b1} \quad (20)$$

где γ_{b4} – коэффициент условий работы, учитывающий влияние главных сжимающих усилий;

σ_{mt}^{max} – главные растягивающие напряжения на уровне центра тяжести приведенного сечения при максимальном значении нагрузки цикла, определяются по общепринятой методике с учетом влияния усилий предварительного обжатия;

γ_{b1} – коэффициент условий работы бетона, учитывающий снижение прочности бетона при циклическом нагружении, принимается в зависимости от значения коэффициента асимметрии цикла $p_b = \sigma_{mt}^{min} / \sigma_{mt}^{max}$.

При армировании шпал высокопрочной стержневой арматурой важное значение имеет вопрос обеспечения трещиностойкости концевых участков.

Расчет трещиностойкости концевых участков шпал при действии усилий предварительного обжатия производится по методике НИИЖБ, по Е. Мершу и по А. Гюйону.

При расчете по методике НИИЖБ трещиностойкость концевых участков будет обеспечена, если выполняется условие:

$$\sigma_{sp} \leq \sigma_{crc}^{0} / \gamma_{sp}; \quad (21)$$

где σ_{sp} – расчетное контролируемое напряжение в арматуре за вычетом потерь предварительного напряжения (σ_1…….σ_5); γ_{sp} = 1,15;

σ_{crc}^{0} – расчетное сопротивление концевого участка образованию трещин.

Зависимость для определения расчетного сопротивления концевого участка образованию трещин может быть записана в виде [4].

$$\sigma_{crc}^{0} = \beta_1 \beta_2 \sqrt{a_1 R_{bp}} \left[11{,}35 + \frac{140}{(d-2)}\right]; \quad (22)$$

Условие трещиностойкости концевых участков по Е. Мершу и А. Гюйону имеет вид:

$$\sigma_y \leq R_{bt} \gamma_{bt} \gamma_{b9}; \quad (23)$$

где σ_y- наибольшее раскалывающее напряжение от действия усилий предварительного напряжения.

Наибольшее значение раскалывающих напряжений вычисляется по формулам:

Е. Мерша $\sigma_y = \frac{1{,}5Z}{ab}$;

А. Гюйона $\sigma_y = k_j \sigma_x$;

k_j – показатели изобар поперечных напряжений;

σ_x – продольные нормальные напряжения на уровне напрягаемой арматуры.

Результаты сравнительных расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчета железобетонных шпал

Среднее сечение									
Варианты	СНиП 2.03.01-84					СП63.13330.2018		Наклонное сечение	
	M_{ult} тс.м	M_{crc} тс.м	M'_{crc} тс.м	M_b тс.м	M'_s тс.м	M_{crc} тс.м	M'_{crc} тс.м	σ_{mt} МПа	$R_{b1}\gamma_{b2}\gamma_{b9}$ МПа
1	1,2	0,64	0,75	1,3	0,98	0,75	0,8	0,12	1,57
2	1,45	0,68	0,78	1,15	0,96	0,78	0,83	0,12	1,57
3	1,49	0,65	0,75	1,07	0,94	0,73	0,79	0,18	1,57
Подрельсовое сечение									
Варианты	СНиП 2.03.01-84					СП63.13330.2018		Наклонное сечение	
	M_{ult} тс.м	M_{crc} тс.м	M'_{crc} тс.м	M_b тс.м	M'_s тс.м	M_{crc} тс.м	M'_{crc} тс.м	σ_{mt} МПа	$R_{b1}\gamma_{b2}\gamma_{b9}$ МПа
1	2,01	1,52	1,2	1,7	1,48	1,6	1,33	0,56	1,57
2	2,39	1,55	1,24	1,74	1,61	1,66	1,4	0,58	1,57
3	2,35	1,49	1,19	1,54	1,55	1,59	1,33	0,72	1,57
Концевой участок									
Варианты	σ_{sp} МПа	σ^0_{crc} МПа	σ_y по Мершу	σ_y по Гюйону		σ_y при сосредо-точенной силе		R_{bt} МПа	
1	723	752	0,61	0,69		1,35		1,4	
2	557	651	0,5	0,53		1,65		1,4	
3	521	651	0,47	0,5		0,99		1,4	

4. Заключение

Выполненные исследования железобетонных шпал с предварительно напряженной арматурой позволили:

1. Разработать метод расчета выносливости нормальных сечений железобетонных шпал с предварительно напряженной стержневой арматурой на основе методик, приведенных в СП 63.13330.2018, СНиП 2.03.01-84 и методики НИИЖБ, учитывающий особенности деформирования таких конструкций при эксплуатационных нагрузках, что позволит получить более экономичные конструктивные решения.
2. Разработать метод расчета трещиностойкости нормальных сечений и торцевых участков железобетонных шпал с предварительно напряженной стержневой арматурой на основе методик, приведенных в СП 63.13330.2018, СНиП 2.03.01-84 и методики НИИЖБ, с учетом особенностей напряженно-деформированного состояния, образования и развития трещин на различных зонах и запроектировать оптимальные конструкции.

Список литературы / References

1. Karpushchenko N., Velichko D., Trukhanov P. Service-life evaluation of reinforced concrete sleepers under various working conditions // Advances in intelligent systems and computing 2020. Т. 1116. С. 125-141. DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3_13.
2. Atutis E., Valivonis J., Atutis M. Deflection determination method for bfrp prestressed concrete beams under fatigue loading // Compos. Struct. 2019. № 226. P. 111182. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111182.
3. Kim G., Loreto G., Kim J.-Y., Kurtis K. E., Wall J. J., Jacobs L. J. In situ nonlinear

ultrasonic technique for monitoring microcracking in concrete subjected to creep and cyclic loading // Ultrasonics. 2018. №88. P. 64–71. DOI: 10.1016/j.ultras.2018.03.006.
4. Li Q., Liu M., Lu Z., Deng X. Creep Model of High-Strength High-Performance Concrete Under Cyclic Loading // J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed. 2019. №3 (34). P. 622–629. DOI: 10.1007/s11595-019-2096-9.
5. Chen P., Zhou X., Zheng W., Wang Y., Bao B. Influence of high sustained loads and longitudinal reinforcement on long-term deformation of reinforced concrete beams // J. Build. Eng. 2020. № 30. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101241.
6. Bouziadi F., Boulekbache B., Haddi A., Hamrat M., Djelal C. Finite element modeling of creep behavior of FRP-externally strengthened reinforced concrete beams // Eng. Struct. 2020. №204. P. 109908. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109908.
7. Mirsayapov Ilshat T. Detection of stress concentration regions in cyclic loading by the heat monitoring method // Mech. Solids. 2010. №1(45). P.133–139. DOI: 10.3103/S0025654410010164.
8. Song L., Fan Z., Hou J. Experimental and Analytical Investigation of the Fatigue Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams // Int. J. Concr. Struct. Mater. 2019. №1(13). DOI: 10.1186/s40069-019-0340-5.
9. Zamaliev F. S., Zakirov M. A. Stress-strain state of a steel-reinforced concrete slab under long-term // Magazine of Civil Engineering. 2018. P. 12–23.
10. Tang H., Chen Z., Avinesh O., Guo H., Meng Z., Engler-Pinto C., Kang H. Notch Insensitivity in Fatigue Failure of Chopped Carbon Fiber Chip-Reinforced Composites Using Experimental and Computational Analysis // Compos. Struct. 2020. №10(16). P. 112280. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112280.
11. Choe G., Shinohara Y., Kim G., Lee S., Lee E., Nam J. Concrete corrosion cracking and transverse bar strain behavior in a reinforced concrete column under simulated marine conditions // Appl. Sci. 2020. №5(10). DOI:10.3390/app10051794.
12. Gambarelli S., Ožbolt J. Interaction between damage and time-dependent deformation of mortar in concrete: 3D FE study at meso-scale // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2019. № 615. P. 012013. DOI:10.1088/1757-899X/615/1/012013.
13. Augeard E., Ferrier E., Michel L. Mechanical behavior of timber-concrete composite members under cyclic loading and creep // Eng. Struct. 2020. №210. P. 110289. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110289.
14. Trekin N. N. Kodysh E. N., Mamin A. N., Trekin D. N. Onana J. Improving methods of evaluating the crack resistance of concrete structures // American Concrete Institute, ACI Special Publication. 2018. № 326. P. 93.1–93.6.
15. Liang J., Nie X., Masud M., Li J., Mo Y. L. A study on the simulation method for fatigue damage behavior of reinforced concrete structures // Eng. Struct.2017. № 150, P. 25–38. DOI:10.1016/j.engstruct.2017.07.001

Информация об авторах.

Илизар Талгатович Мирсаяпов, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: mirsayapov1@mail.ru

Information about the authors.

Ilizar T. Mirsayapov, Doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
E-mail: mirsayapov1@mail.ru

УДК: 624.04
DOI: 10.52409/20731523_2022_3_23
EDN: PWMVRW

Продольный изгиб сжатого упругого стержня с одинаковыми нелинейными поворотными закреплениями на концах с учётом начальной кривизны

Л.И. Хайдаров[1], Р.А. Каюмов[1], Г.Н. Шмелев[1], А.Р. Гимазетдинов[1],
[1]Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* В сборно-разборных металлических каркасных системах узлы соединения ригелей со стойками часто выполняются клинового или чашечного типа. В таких соединениях зависимость изгибающего момента от угла взаимного поворота элементов является нелинейной. На данный момент отсутствует инженерная методика оценки несущей способности стойки, имеющего на концах закрепления с нелинейной поворотной жёсткостью. Целью этой работы является разработка инженерной методики определения предельной силы сжатия для упругого призматического стержня с концевыми закреплениями с одинаковой нелинейной монотонно убывающей поворотной жёсткостью с учётом начальной кривизны. Задачами исследования являются: вывод зависимостей для продольной силы в центрально сжатом стержне при прямолинейной форме и наличии начальной кривизны, анализ установленных зависимостей и получение на их основе способа определения предельной силы сжатия.
Результаты. Получена приближённая формула для определения силы сжатия в упругом стержне в зависимости от его изгибной жёсткости, длины и стрелы начального прогиба, а также функции изгибающего момента и угла поворота на концах.
Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что предложенная формула позволяет определить предельную силу сжатия упругого стержня с концевыми закреплениями, имеющими одинаковые нелинейные монотонно убывающие поворотные жёсткости, с учётом начальной кривизны, например, для стоек сборно-разборных каркасных систем.

Ключевые слова: продольный изгиб, закритический изгиб, начальная кривизна, нелинейная монотонно убывающая поворотная жёсткость, геометрическая нелинейность.

Для цитирования: Хайдаров Л. И., Каюмов Р. А., Шмелев Г. Н., Гимазетдинов А. Р. Продольный изгиб сжатого упругого стержня с одинаковыми нелинейными поворотными закреплениями на концах с учётом начальной кривизны // Известия КГАСУ. 2022. № 3 (61). С. 23-35, DOI: 10.52409/20731523_2022_3_23, EDN: PWMVRW

Buckling of a concentrically loaded imperfect elastic column with identical nonlinear rotational connections

L.I. Khaidarov[1], R.A. Kayumov[1], G.N. Shmelev [1], A.R. Gimazetdinov[1]
[1]Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract. *Problem statement.* The connections of the demountable metal frame systems are often made of a wedge or cup type. In such connections the dependence of the bending moment on the angle of mutual rotation of the elements is nonlinear. Currently there is no engineering methodology for assessing the bearing capacity of a pillar with non-linear rotational end connections. The purpose of this article is to develop an engineering methodology for determining the ultimate compression force for an elastic prismatic column with nonlinear rotational connections with monotonically decreasing stiffness. The objectives of the study are derivation of dependencies for the normal force in a centrally compressed beam-column with and without initial curvature, analysis of the established dependencies and obtaining a methodology for determining the ultimate compression force.
Results. An approximate formula is obtained for determining the compression force in an elastic column depending on its bending stiffness, the length and initial curvature, the function of the bending moment and the angle of rotation at the ends.
Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry lies in the fact that the proposed formula allows determining the ultimate compression force for an imperfect elastic prismatic column with identical nonlinear rotational connections with monotonically decreasing stiffness.

Keywords: beam-column with non-linear connections, post-buckling behavior, initial curvature, monotonically decreasing stiffness, second-order analysis.

For citation: Khaidarov L. I., Kayumov R. A., Shmelev G. N., Gimazetdinov A. R. Buckling of a concentrically loaded imperfect elastic column with identical nonlinear rotational connections// News KSUAE, 2022. №3 (61), p. 23-35, DOI: 10.52409/20731523_2022_3_23, EDN: PWMVRW.

1. Введение

В качестве несущих каркасов сооружений для культурно массовых мероприятий, таких как трибуны, сцены, башни и т.д. часто применяются металлические каркасные системы сборно-разборного типа. Наравне с несущей способностью от сборно-разборных систем требуется удобство и возможность быстрого монтажа и демонтажа. Преимущественно используются системы с соединениями элементов клинового и чашечного типа. Поворотная жёсткость этих соединений существенно влияет на несущую способность стоек каркаса [1 – 4]. В отечественных нормативных документах, а именно СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» и СП 294.1325800.2017 «Конструкции стальные. Правила проектирования», представлены методики расчета центрально и внецентренно сжатых стержневых конструкций при линейной зависимости между изгибающими моментами и соответствующими углами поворота на концах. Но в соединениях клинового и чашечного типа зависимость изгибающего момента от угла взаимного поворота соединяемых элементов нелинейна во всем интервале деформирования, при этом поворотная жёсткость монотонно убывает [5 – 9].

Первое теоретическое исследование устойчивости упругого центрально-сжатого стержня было выполнено Л. Эйлером. На данный момент проблемам устойчивости и закритический работе стержней посвящено большое количество работ [10 – 13].

Укажем последние публикации по данной теме. В работах [14 – 17] решены задачи по устойчивости и закритической работе стержней в упругой среде. Обнаружено, что при большой длине стержня после потери устойчивости дальнейшие его деформации происходят даже при силе меньше критической, т.е. происходит явление хлопка.

Устойчивость и формы равновесия упругого стержня, расположенного между двумя жесткими стенками, препятствующими его выпучиванию, рассмотрены в [18]. В работе [19] исследована закритическая работа нелинейно упруго закрепленного стержня от поворота и предложен итеративный метод по расчету его податливости. Результаты, полученные согласно предложенному методу, сравниваются с известными аналитическими решениями в технической литературе и с результатами, полученными на конечно-элементных моделях с использованием программы ABAQUS. В работе [20] предложен аналитический метод оценки устойчивости, изгибающих моментов, поперечных сил и прогибов стоек с учётом начальной кривизны, крена и эксцентриситетов приложения сил сжатия при нелинейно работающих концевых закреплениях. Способ решение является итеративным.

Для правильного проектирования сооружений на основе сборно-разборных каркасных систем необходимо разработать простую и надёжную инженерную методику определения несущей способности стоек сборно-разборных каркасных систем. Как часть разработки такой методики, в данной работе исследуется продольный изгиб упругого призматического стержня с концевыми закреплениями с одинаковой нелинейной поворотной жёсткостью с учётом начальной кривизны с целью определения предельной силы сжатия.

Целью работы является разработка инженерной методики определения предельной силы сжатия для упругого призматического стержня с концевыми закреплениями с одинаковой нелинейной монотонно убывающей поворотной жёсткостью с учётом начальной кривизны. При этом задачами исследования являются:

– вывод зависимостей для продольной силы в центрально сжатом стержне при прямолинейной форме и наличии начальной кривизны;

– анализ установленных зависимостей и получение на их основе способа определения предельной силы сжатия для стержня.

2. Материалы и методы

Как известно, первой критической силе для стержня с шарнирным закреплением обоих концов соответствует форма равновесия в виде полуволны синусоиды, для стержня с жёстким защемлением обоих концов – в виде одной волны синусоиды. Так как идеальный шарнир и абсолютное защемление являются двумя предельными случаями поворотного закрепления с конечной жёсткостью, форма равновесия стержня с конечной поворотной жёсткостью концевых закреплений, соответствующая первой критической силе, будет в виде части синусоиды от полуволны до одной волны. При одинаковых концевых закреплениях эта форма будет симметричной относительно середины длины стержня (рис. 1, а). При изгибе стержня закрепления оказывают сопротивление повороту концов стержня в виде реактивных моментов. Рассмотрим упругий стержень длиной l [см] и изгибной жёсткостью EJ [кН·см^2] под действием сжимающих сил P [кН] с учётом замены поворотных закреплений одинаковыми концевыми моментами M_1 [кН·см] (рис. 1, б). Будем иметь в виду, что при такой замене возникают дополнительные формы равновесия, соответствующие случаям поворота концов стержня по направлению действия концевых моментов, которые не представляют для нас интереса («форма I» на рис. 1, б).

Основное уравнение изогнутой оси сжатого стержня с одинаковыми моментами на концах имеет вид [10]:

$$EJ\frac{d^2y}{dz^2} = -Py + M_1 \quad (1)$$

Введя обозначение $k = \sqrt{P/EJ}$ уравнение упругой линии представим в виде:

$$y = A\,sin(kz) + B\cos(kz) + \frac{M_1}{k^2EJ} \quad (2)$$

а) б)

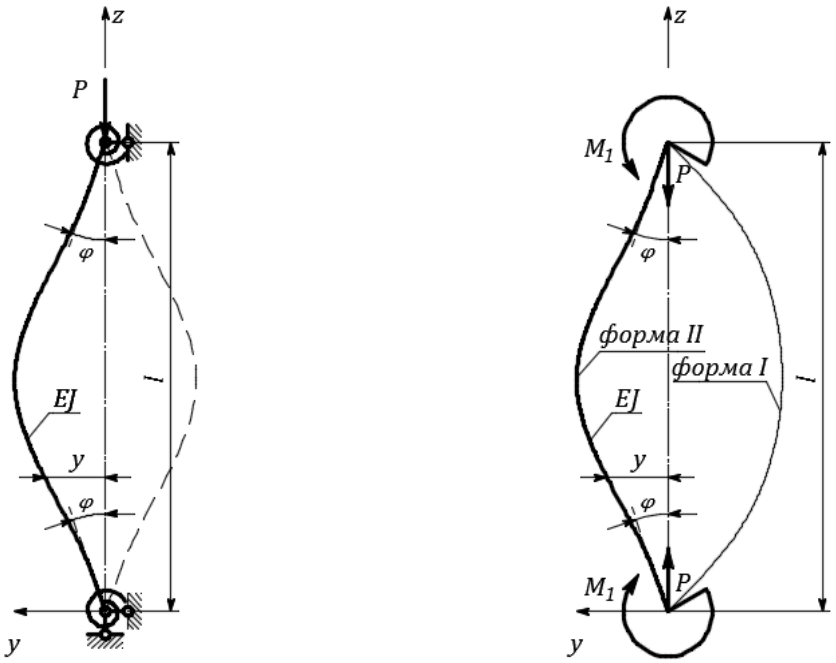


Рис. 1. Первые формы равновесия стержня:
а) с одинаковыми концевыми поворотными закреплениями; б) с одинаковыми концевыми моментами (иллюстрация авторов)
Fig. 1. Lower forms of beam-column equilibrium: a) with identical rotational connections; б) with equal end moments (author's illustration)

С учётом граничных условий $y(0) = y(l) = 0$ получим:

$$y = \frac{M_1}{k^2 EJ}\left(1 - \ tg(k\ l/2)\ sin(kz) - cos\ (kz)\right) \tag{3}$$

Первая производная от функции прогиба равна:

$$\frac{\partial y}{\partial z} = \frac{M_1}{kEJ}\left[sin(kz) - cos(kz)\ tg(k\ l/2)\right] \tag{4}$$

В опорных сечениях угол поворота осевой линии определяется выражением:

$$\varphi = -\frac{M_1}{kEJ}\ tg\left(\frac{k\ l}{2}\right) \tag{5}$$

Соотношение (5) означает, что упругий стержень длиной l и изгибной жёсткости EJ с концами, повёрнутыми на угол φ, будет находиться в состоянии равновесия под действием сжимающих сил P (соответствующих значению параметра k) и одинаковых концевых моментов M_1.

Приведём уравнение (5) к следующему виду:

$$\frac{k\ l/2}{tg(k\ l/2)} = -\frac{M_1 l}{2\ \varphi\ EJ} \tag{6}$$

Чтобы выразить k через остальные параметры решим уравнение (6) для $(k\ l\ /\ 2)$. Наличие периодической функции тангенса в уравнении (6) свидетельствует о бесконечном количестве решений. Нас интересует наименьшее решение при положительном значении отношения $(M_1\ /\ \varphi)$, т.е. при взаимно противоположных направлениях угла поворота стержня на опоре и концевого момента, так как в дальнейшем концевой момент будет рассматриваться как реактивный момент. Это

решение соответствует форме II на рис. 1, б. Вышеуказанным условиям соответствует интервал [$\pi/2$; π]. Для получения приближённого решения левую часть уравнения (6) в указанном интервале можно аппроксимировать следующей алгебраической функцией:

$$f_{\text{a}} = \zeta \frac{(\pi/2)-(k\,l/2)}{\pi-(k\,l/2)} \tag{7}$$

где ζ – коэффициент, влияние которого на погрешность решения, вызванной аппроксимацией, будет рассмотрено далее в работе.

Выразим k с учётом замены левой части уравнения (6) функцией (7):

$$k \approx \frac{\pi}{l}\left(1+\frac{1}{1+2\,\zeta\frac{\varphi}{M_1}\frac{EJ}{l}}\right) \tag{8}$$

Отметим, что при постоянных значениях длины l и изгибной жёсткости EJ стержня уравнение (5) может быть удовлетворено для всех комбинаций значений M_1 и φ за счёт соответствующего значения параметра k, т.е. решение (8) является общим для всех значений M_1 и φ, соответствующих условию (M_1 / φ > 0), в том числе и для случая функциональной зависимости между ними.

Запишем уравнения кривой состояний равновесия:

$$P = k^2 EJ \approx \frac{\pi^2\,EJ}{l^2}\left(1+\frac{1}{1+2\,\zeta\frac{\varphi}{M_1}\frac{EJ}{l}}\right)^2 \tag{9}$$

Оценим погрешность приближённого решения по формуле (9), вызванной аппроксимацией по формуле (7). Для этого примем условно 1000 значений $(k\,l\,/\,2)_{i,\text{ точн.}}$, равномерно расположенные в интервале [$\pi/2$; π]. Далее найдем соответствующие им значения отношений по формуле (6):

$$\left(\frac{-M_1 l}{2\,\varphi\,EJ}\right)_i = \frac{(k\,l/2)_{i,\text{точн.}}}{tg(k\,l/2)_{i,\text{точн.}}} \tag{10}$$

Вычислим приближённые решения по следующей формуле:

$$\left(\frac{kl}{2}\right)_i = \frac{\pi}{2}\left(1+\frac{1}{1+\,\zeta/(-M_1 l/2\,\varphi\,EJ)_i}\right) \tag{11}$$

Оценим относительную погрешность приближённого решения по формуле (9) следующим образом:

$$\delta_P = \frac{P-P_{\text{точн.}}}{P_{\text{точн.}}}\cdot 100\% = \frac{(k\,l/2)_i^2-(k\,l/2)_{i,\text{точн.}}^2}{(k\,l/2)_{i,\text{точн.}}^2}\cdot 100\% \tag{12}$$

На рис. 2. представлены графики изменения ширины интервала относительной погрешности $\delta_{P,\sum}$, а также её наибольшего $\delta_{P,max}$ и отрицательного значений $\delta_{P,min}$, вычисленных по формуле (12) для всех выбранных точек $(kl/2)_{i,\text{ точн.}} \in [\pi/2;\ \pi]$, при значениях коэффициента $\zeta \in [2;\ 3]$. Отрицательная погрешность отсутствует при $\zeta \in [0;\ 2]$ и растёт при $\zeta > 2$. Положительная погрешность при $\zeta \in [0;2{,}48]$ убывает и $\zeta > 2.48$ равна 0. Минимальная ширина интервала относительной погрешности соответствует $\zeta \approx 2{,}44$: $\delta_{P,\sum} = 2{,}30\%$; $\delta_{P,max} = +0{,}16\%$; $\delta_{P,min} = -2{,}14\%$.

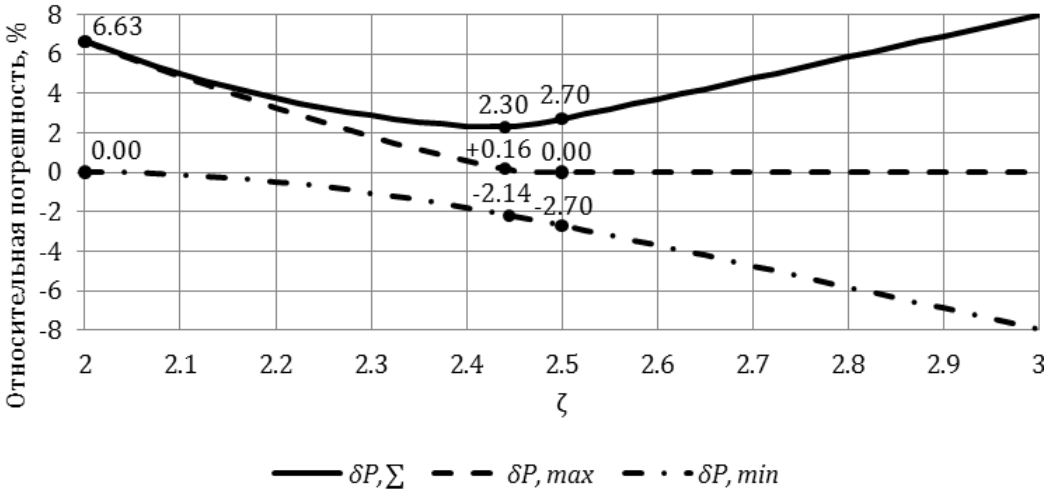


Рис. 2. К оценке относительной погрешности формулы (9) (иллюстрация авторов)
Fig. 2. For the estimation of relative error of the formula (9) (author's illustration]

Для дальнейшего исследования примем ζ = 2,5 для исключения завышенных значений продольной силы по формуле (9), при этом наибольшая отрицательная погрешность составляет -2,7%, что достаточно точно для инженерных расчетов.

В случае стержня с одинаковыми концевыми поворотными закреплениями при повороте концов стержня будут возникать реактивные опорные моменты, являющиеся функциями углов поворота:

$$M_1 = M_{\text{оп}}(\varphi) \tag{13}$$

С учётом (10) и ζ = 2,5 перепишем уравнение (9):

$$P \approx \frac{\pi^2 EJ}{l^2}\left(1 + \frac{1}{1 + 5\frac{\varphi}{M_{\text{оп}}}\frac{EJ}{l}}\right)^2 \tag{14}$$

Из формулы (14) видно, что при постоянных значениях изгибной жёсткости EJ и длины l наибольшее значение силы сжатия соответствует наибольшему значению отношения ($M_{\text{оп}}/\varphi$), т.е. секущей поворотной жёсткости опорного узла.

Далее рассмотрим стержень с учётом начальной кривизны, которая равна кривизне дуги окружности со стрелой прогиба a. Пусть при сжатии работа упругого стержня с одинаковыми нелинейными поворотными опорами концов, которые повернуты на соответствующий начальный угол φ_0, эквивалентна работе прямолинейного упругого стержня, изогнутого концевыми моментами M_0 с поворотными опорами, которые начинают сопротивляться только после поворота концов стержня на угол φ_0 (рис. 3):

$$M_1 = M_{\text{оп}}(\varphi - \varphi_0) - M_0 \tag{15}$$

Здесь:

$M_0 = 8\ a\ EJ / l^2$ – концевые изгибающие моменты, обеспечивающие искривление стержня по стреле окружности со стрелой начального прогиба a;

$\varphi_0 = 4\ a / l$ – начальный угол поворота концов стержня.

Запишем уравнение кривой состояний равновесия (9) с учётом (15) и замены аргумента φ на $(\varphi + \varphi_0)$ для установления в качестве начала отсчёта угла поворота φ_0:

$$P \approx \frac{\pi^2 EJ}{l^2}\left(1 + \frac{1}{1 + 5\frac{(\varphi + \varphi_0)}{(M_{\text{оп}} - M_0)}\frac{EJ}{l}}\right)^2 \tag{16}$$

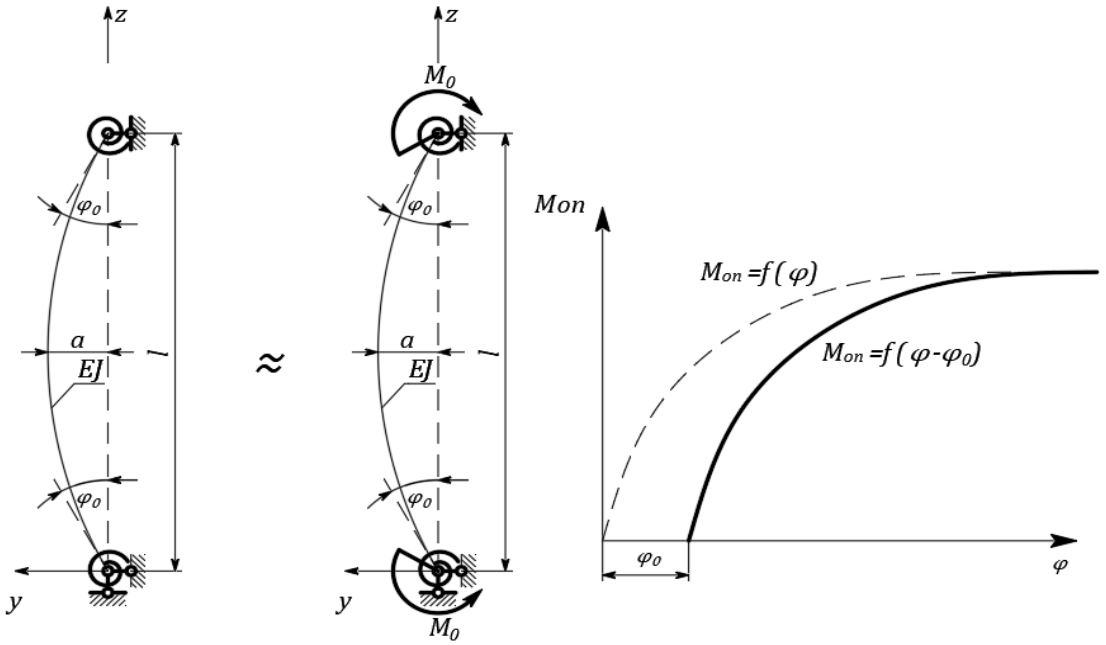


Рис. 3. К расчету стержня с одинаковыми нелинейными поворотными опорами с учётом начальной постоянной кривизны
(иллюстрация авторов)
Fig. 3. For the calculation of the beam-column with identical nonlinear rotational connections taking into account initial constant curvature
(author's illustration)

Для проверки формулы (16) воспользуемся решением методом конечных элементов в ПК «ANSYS» в геометрически нелинейной постановке. Работу концевых закреплений зададим в виде кусочно-линейной диаграммы. Нагружение подвижного конца стержня выполним кинематически. В качестве кривой состояний равновесия примем график на основе ряда углов поворота и соответствующих опорных реакций у неподвижного конца стержня, полученных в процессе нагружения.

3. Результаты и обсуждение

Для проверки формулы (14), в первую очередь, покажем ее результаты для классических задач устойчивости стержней с опорами с одинаковой постоянной поворотной жёсткостью, т.е. при одинаковой линейной зависимости между изгибающим моментом и углом поворота в опорных узлах. Отметим, что структура формулы (14) подобна структуре формулы Эйлера:

$$P_{\text{crit}} = \pi^2 EJ / (\mu\, l)^2 \tag{17}$$

и выражение в скобках формулы (14) соответствует обратному значению коэффициента расчетной (приведённой) длины:

$$\mu = \frac{\frac{M_{\text{оп}}}{\varphi}\frac{l}{EJ} + 5}{2\frac{M_{\text{оп}}}{\varphi}\frac{l}{EJ} + 5} \tag{18}$$

Ниже представим результаты расчета μ по формуле (18) для стержней с опорами с одинаковой постоянной поворотной жёсткостью (табл. 1).

Коэффициенты расчетной длины стержней Таблица1

№ п/п	Концевые закрепления от поворота	Отношение ($M_{оп}/\varphi$), кН·см	Коэффициент расчетной длины μ
1	Идеальный шарнир	0	1
2	Абсолютно жёсткое защемление	∞	0.5
3	Упругие шарниры с конечной линейной поворотной жёсткостью	c_m	$\frac{\frac{c_m l}{EJ}+5}{2\frac{c_m l}{EJ}+5}$

Далее рассмотрим случаи нелинейной зависимости между опорным изгибающим моментом и углом поворота следующего вида:

$$M_{оп} = c_0 \varphi / (1 + c_1 \varphi) \quad (19)$$

где c_0 и c_1 – коэффициенты, определяющие начальную поворотную жёсткость и скорость её изменения.

Такой вид аппроксимации зависимости изгибающего момента от угла поворота принят для узлов соединения ригеля со стойкой многих модульных каркасных систем сборно-разборного типа.

Определим кривые состояний равновесия для трёх численных примеров зависимости опорного изгибающего момента от угла поворота (табл. 2). Значение изгибной жёсткости, указанной в таблице 2, соответствует изгибной жёсткости стальной трубы Ø48,3×3,2 (мм) в упругой стадии работы. Графики зависимостей опорного изгибающего момента от угла поворота для примеров представлены на рис. 4. Для стержня с указанными значениями длины и изгибной жёсткости при начальной поворотной жёсткости, принятой в примере №1, закрепление в начале поворота близко к идеальному шарниру, в примере №2 – к полужёсткому соединению, в примере №3 – к абсолютному защемлению.

Значения параметров Таблица 2

№ примера	Длина стержня l, см	Изгибная жёсткость стержня EJ, кН·см^2	Коэффициенты функции $M_{оп}$ (φ)	
			c_0, кН·см	$c1$
1	200	239 000	100	1
2			10 000	100
3			100 000	1 000

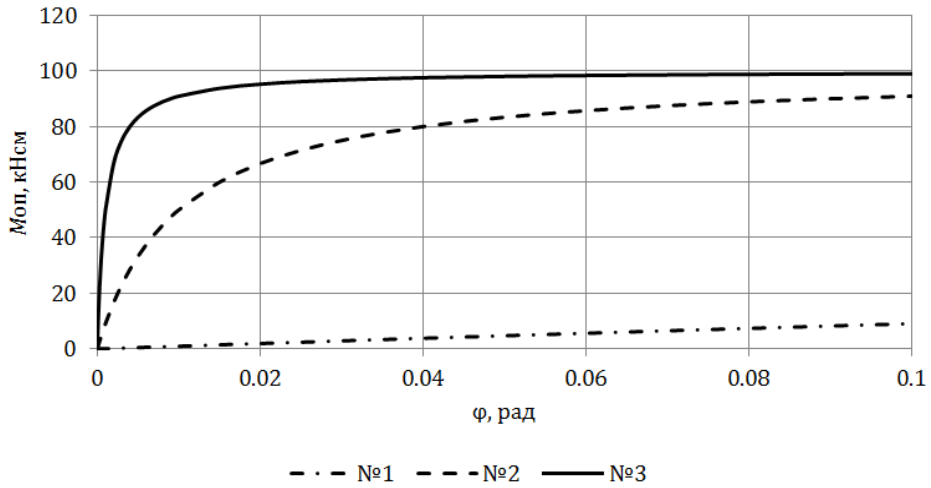


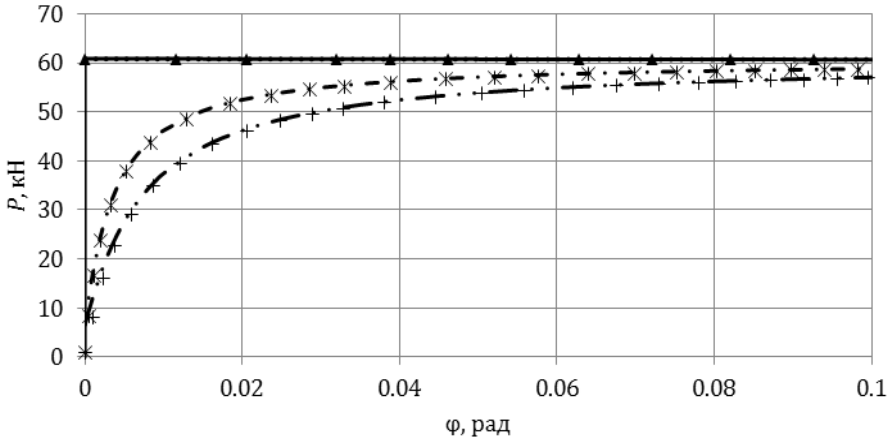
Рис. 4. Графики зависимостей опорного изгибающего момента от угла поворота (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Plot of the bending moment of rotation angle (author's illustration)

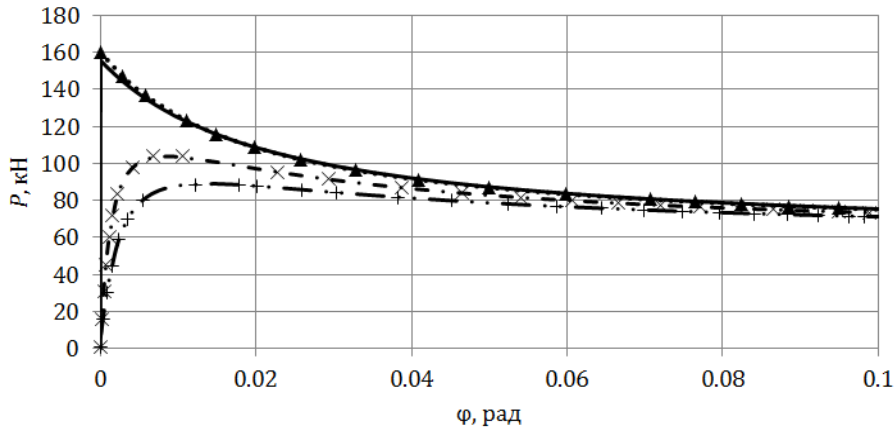
Кривые состояний равновесия для вышеуказанных случаев при отсутствии начальной кривизны и при её наличии с относительной стрелой прогиба 1/1000 и 1/500, полученные по формуле (13), представлены на рис. 5 (обозначено как Аналит. I).

На рис. 5 также представлены графики аналитического решения при отсутствии начальной кривизны по методу, представленному в работе Каюмова Р. А. и др.[1] (обозначено Аналит. II) и численного решения при наличии начальной кривизны стержня (обозначено как Числ.).

а)



б)



в)

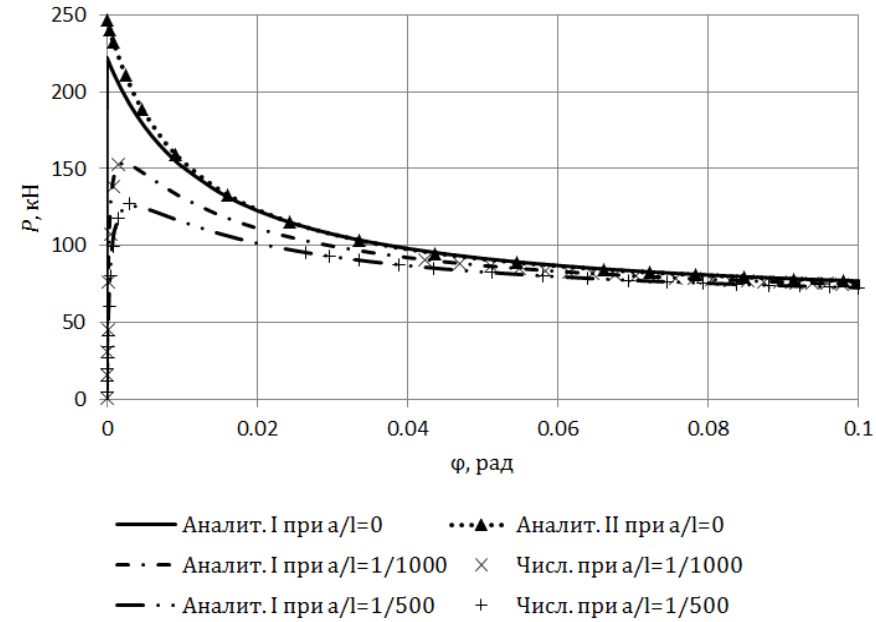


Рис. 5. Кривые состояний равновесия для примеров: а) №1; б) №2; в) №3 (иллюстрация авторов)
Fig. 5. Curves of equilibria for examples a) №1; б) №2; в) №3 (author's illustration)

[1]Каюмов Р. А., Хайдаров Л. И., Гимазетдинов А. Р. Податливость сжатых стержней с упругой опорой с учётом их закритического поведения // Известия КГАСУ. 2021. № 3 (57). С. 5–12. DOI: 10.52409/20731523_2021_3_5. [Kayumov R. A., Khaidarov L. I., Gimazetdinov A. R. Compliance of compressed beam-columns with semi-rigid supports, taking into account their post-buckling behavior // News of the KSUAE. 2021. Iss. 3 (57). P. 5–12. DOI: 10.52409/20731523_2021_3_5].[1]

В первую очередь сделаем анализ решений, полученных по формуле (14) для стержней с опорами с одинаковой постоянной поворотной жёсткостью. В данном случае согласно формуле (14) значение продольной силы не зависит от угла поворота концов стержня. Это справедливо при малых углах наклона в связи с приближённым видом уравнения (1). На самом деле после потери устойчивости согласно эластике Эйлера [13] происходит медленный рост продольной силы в стержне, но в связи с малостью изменения этой силы, для большинства задач в строительстве им можно «в запас» пренебречь.

Легко видеть, что значения, представленные в таблице для стержней с идеальными шарнирами и абсолютным защемлением концов, соответствуют известным решениям. В случае конечной поворотной жёсткости концевых опор коэффициент расчетной длины, вычисляемый по формуле (18), приближённо равен его значению, представленному в СП 294.1325800.2017:

$$\mu = (n + 4.8) / (2\,n + 4.8) \tag{20}$$

где $n = c_m\, l / EJ$;

c_m – поворотная жёсткость концевых закреплений.

Далее выполним анализ кривых состояний равновесия стержня с закреплениями, имеющими монотонно убывающие поворотные жёсткости (рис. 5). Зависимости, полученные по формуле (16) и другими методами, аналогичны. Однако при отсутствии начальной кривизны наибольшая сила сжатия соответствует прямолинейному стержню. После поворота концов состояние стержня становится неустойчивым и его равновесие возможно только при уменьшении силы сжатия.

При наличии начальной кривизны на графиках можно наблюдать максимумы силы сжатия (рис. 5 б, в). После экстремума стержень переходит в состояние неустойчивого равновесия. Согласно формуле (16) точка экстремума соответствует наибольшему значению отношения $(M_{оп} - M_0) / (\varphi + \varphi_0)$ и предельную силу сжатия для стержня можно определить по условию (21) или графическим способом, построив кривую состояний равновесия.

$$\frac{\partial\,(M_{оп} - M_0)/(\varphi + \varphi_0)}{\partial \varphi} = 0 \tag{21}$$

Отметим, что увеличение начальной стрелы прогиба упругого стержня с закреплениями с монотонно убывающей поворотной жёсткостью, в отличие от закреплений с постоянной жесткостью, приводит к уменьшению предельной силы сжатия.

В таблице 3 представлены значения предельных сил сжатия для рассмотренных примеров, вычисленных по формуле (16) и по другим вышеуказанным методам. Относительная разница результатов по формуле (16) по сравнению с остальными решениями находится в пределах (-3; +1) %, соответственно, формула (16) достаточно точно и просто позволяет определить значение предельной силы сжатия для упругого стержня с концевыми закреплениями с одинаковой нелинейной монотонно убывающей поворотной жёсткостью с учётом начальной кривизны.

Результаты расчета для примеров №1 – 3 Таблица 3

№ п/п	Пример	Относительный прогиб *a/l*	Способ решения	Наибольшая сила сжатия, кН	Относительная разница, %
1	№1	0	Аналит. I	60.85	–
2			Аналит. II	60.85	0.0
3		1/1000	Аналит. I	58.9	–
4			Числ.	59.54	-1.1
5		1/500	Аналит. I	57.24	–
6			Числ.	58.58	-2.3

Результаты расчета для примеров №1 – 3 Таблица 3

№ п/п	Пример	Относительный прогиб *a/l*	Способ решения	Наибольшая сила сжатия, кН	Относительная разница, %
7	№2	0	Аналит. I	155.71	–
8			Аналит. II	159.99	-2.7
9		1/1000	Аналит. I	103.80	–
10			Числ.	104.08	-0.3
11		1/500	Аналит. I	89.04	–
12			Числ.	88.24	+0.9
13	№3	0	Аналит. I	222.36	–
14			Аналит. II	222.48	-0.1
15		1/1000	Аналит. I	153.54	–
16			Числ.	153.01	+0.3
17		1/500	Аналит. I	125.53	–
18			Числ.	127.16	-1.3

4. Заключение

1. Получены зависимости для продольной силы в упругом стержне с концевыми закреплениями, имеющими одинаковые нелинейные поворотные жёсткости, при центральном сжатии, аргументами которых являются изгибная жёсткость стержня, ее длина, значение начальной кривизны, изгибающий момент, углы поворота на концах. Относительная разница результатов по предложенной формуле (16) по сравнению с остальными решениями находится в пределах (-3; +1) %.

2. Для прямолинейного упругого стержня, имеющего одинаковые концевые закрепления с одинаковой поворотной жёсткостью, наибольшее значение силы сжатия соответствует прямолинейной форме. После поворота концов состояние стержня становится неустойчивым и её равновесие возможно только при уменьшении силы сжатия.

3. Выявлено, что для упругого стержня, имеющего начальную кривизну и концевые закрепления с одинаковыми монотонно убывающими поворотными жёсткостями, на кривой состояний равновесия имеется точка экстремума, а именно максимум. Указаны способы определения предельной силы сжатия, соответствующей этому максимуму.

4. Увеличение начальной кривизны упругого стержня с закреплениями с монотонно убывающей поворотной жёсткостью, в отличие от случая с постоянной жесткостью, приводит к уменьшению предельной силы сжатия.

Список литературы/ References

1. Peng J. L., Ho C. M., Chan S. L., Chen W. F. Stability study on structural systems assembled by system scaffolds // Journal of Constructional Steel Research. 2017. V. 137, P. 135–151. DOI: 10.1016/J.JCSR.2017.06.004.
2. Mercier C., Khelil A., Al Mahmoud F., Blin-Lacroix J. L., Pamies A. Experimental investigations of buckling behaviour of steel scaffolds // Structures. 2021. V. 33. P. 433–450. DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2021.04.045.
3. Liu H., Jia L., Wen S., Liu Q., Wang G., Chen Z. Experimental and theoretical studies on the stability of steel tube-coupler scaffolds with different connection joints // Engineering Structures. 2016. V. 106. P. 80–95. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2015.10.015.
4. Dewobroto W., Chendrawan W. Ultimate Load Capacity Analysis of Steel Scaffoldings Using Direct-Analysis Method // Practice Periodical on Structural Design and Construction. 2018. V. 23. № 4. DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000392.
5. Beale R., André J. Design Solutions and Innovations in Temporary Structures // Târgovişte: IGI Global, 2017. 503 p.
6. Zheng Y., Guo Z. Investigation of joint behavior of disk-lock and cuplok steel tubular scaffold // Journal of Constructional Steel Research. 2021. V. 177. DOI: 10.1016/J.JCSR.2020.106415.

7. Pieńko M., Błazik-Borowa E. Experimental studies of ringlock scaffolding joint. Journal of Constructional Steel Research. 2020. V. 173. DOI: 10.1016/J.JCSR.2020.106265.
8. Pisarek, Z., Sudoł P. Experimental tests of joints in scaffolding system. // Proceedings of CEE 2019. Advances in resource-saving technologies and materials in civil and environmental engineering. 2019. V. 47. P. 331–339. DOI: 10.1007/978-3-030-27011-7_42.
9. Błazik-Borowa E., Szer J., Borowa A., Robak A., Pieńko M. Modelling of load-displacement curves obtained from scaffold components tests // Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences. 2019. V. 67. Iss. 2. P. 317–327. DOI: 10.24425/bpas.2019.128602.
10. Тимошенко С. П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. М. : Наука, 1971. 808 с. [Timoshenko S. P. Stability of rods, plates and shells. M. : Nauka, 1971. 808 p.].
11. Вольмир А. С. Устойчивость упругих систем. М. : Физматгиз, 1963. 880 с. [Vol`mir A. S. Stability of elastic systems. M. : Phymathgis, 1963. 880 p.].
12. Ржаницын А. Р. Устойчивость равновесия упругих систем. М. : ГИИТЛ, 1955. 478 с. [Rghanitsyn A. R. Stability of equilibria of elastic systems. M. : GIITL, 1955. 478 p.].
13. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. 712 с. [Rabotnov Yu. N. Solid mechanics. M.: Nauka, 1988. 712 p.]
14. Каюмов Р. А. Закритическое поведение сжатых стержней в упругой среде // Известия РАН. Механика твердого тела. 2017. №5. С. 122–129. DOI: 10.3103/S0025654417050120 [Каюмов Р. А. Postbuckling behavior of compressed rods in an elastic medium // Mech. Solids. 2017. Iss. 5. P. 122–129. DOI: 10.3103/S0025654417050120].
15. Areiza-Hurtado M., Aristizábal-Ochoa J. D. Second-order analysis of a beam-column on elastic foundation partially restrained axially with initial deflections and semirigid connections // Structures. 2019. V. 20. P. 134–146. DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2019.03.010.
16. Carvajal-Munoz J. S., Vega-Posada C. A., Saldarriaga-Molina J. C. Analysis of beam-column elements on non-homogeneous soil using the differential transformation method. // Revista Facultad de Ingenieria. 2022. № 103, P. 67–76. DOI: 10.17533/udea.redin.20210218.
17. Yayli, M. Ö. Buckling analysis of Euler columns embedded in an elastic medium with general elastic boundary conditions // Mechanics Based Design of Structures and Machines. 2018. №46, P. 110–122. DOI: 10.1080/15397734.2017.1292142.
18. Тарасов В. Н. Об упругой линии сжимаемого продольной силой стержня, расположенного между двумя жёсткими стенками // Вестник Сыктывкарского университета. Серия 1: Математика. Механика. Информатика. 2018. Вып. 1 (26). С. 29–46 [Tarasov V. N. On the elastic line of the rod compressible by longitudinal force located between two rigid walls, Bulletin of Syktyvkar University, Series 1: Mathematics. Mechanics. Informatics. 2018. Iss. 1 (26). P. 29–46].
19. Giraldo-Londoño O., Monsalve-Giraldo J. S., Aristizabal-Ochoa J. D. Large-deflection and postbuckling of beam-columns with non-linear semi-rigid connections including shear and axial effects // International Journal of Non-Linear Mechanics. 2015. T. 77. C. 85-95. DOI: 10.1016/J.IJNONLINMEC.2015.07.009.
20. Aristizabal-Ochoa, J. D. Stability of imperfect columns with nonlinear connections under eccentric axial loads including shear effects // International Journal of Mechanical Sciences. 2015. T. 90. C. 61–76. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.11.005.

Информация об авторах.

Ленар Ильнурович Хайдаров, ассистент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: haidarov_lenar@mail.ru
Рашит Абдулхакович Каюмов, доктор физико-математических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: kayumov@rambler.ru
Геннадий Николаевич Шмелев, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: gn.shmelev@mail.com
Айваз Расимович Гимазетдинов аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: aivazaivaz1313@gmail.com

Information about the authors

Lenar Ilnurovich Khaidarov, assistant, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia
Email: haidarov_lenar@mail.ru
Rashit Abdulhakovich Kayumov, doctor of physical-mathematical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia
Email: kayumov@rambler.ru
Genadij Nikolaevich Shmelev candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia
E-mail: gn.shmelev@mail.ru
Aivaz Rasimovich Gimazetdinov post-graduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia
Email: aivazaivaz1313@gmail.com

УДК: 624.074
DOI: 10.52409/20731523_2022_3_36
EDN: PRRORX

Аналитический расчет прогибов плоской внешне статически неопределимой фермы

М.Н. Кирсанов[1]
[1]Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»
г. Москва, Российская федерация

Аннотация. *Постановка задачи*. Плоская статически определимая решетчатая ферма с прямолинейным нижним поясом и криволинейным верхним имеет три подвижные и одну неподвижную опоры. Для такого случая требуется вывести формулу зависимости от числа панелей величины прогиба фермы и горизонтального смещения подвижных опор. Цель работы – исследовать конструкцию на ее кинематическую изменяемость и получить формулу зависимости от числа панелей прогиба конструкции и сдвига подвижной опоры при трех типах нагружения фермы. Задачи исследования заключаются в разработке схемы статически определимой фермы с четырьмя опорами, определении условий кинематической изменяемости конструкции и получении аналитических зависимостей прогиба и усилия в некоторых стержнях от числа панелей. Для определения усилий в стержнях и реакций опор составляется и решается система уравнений равновесия шарнирных узлов. Прогиб определяется с помощью интеграла Мора. Обобщение аналитических решений ряда ферм с различным числом панелей на случай произвольного числа панелей выполнено с помощью операторов символьной математики Maple. Коэффициенты при подобных выражениях в искомой формуле определяются из рекуррентных уравнений, составленных в этой системе на основе анализа последовательности решений.
Результаты. Показано, что для некоторого числа панелей ферма обладает свойством мгновенной изменяемости. Это подтверждается найденным распределением виртуальных скоростей шарниров конструкции. Рассмотрено действие равномерной распределенной узловой нагрузки по криволинейному верхнему или нижнему поясам и действие сосредоточенной нагрузки на середину пролета. Получены аналитические зависимости усилий в наиболее растянутых и сжатых элементах от числа панелей в ферме.
Выводы. Предложена схема фермы, допускающая получение конечной формулы для зависимости прогиба и усилий в стержнях при произвольном числе панелей. Показано, что прогиб скачкообразно зависит от числа панелей, что дает возможность увеличить жесткость, подобрав оптимальное число панелей. Предложенный алгоритм вывода расчетных формул может быть использован при нахождении аналитических решений для других регулярных конструкций.

Ключевые слова: ферма, прогиб, Maple, индукция, кинематическая изменяемость

Для цитирования: М.Н.Кирсанов Аналитический расчет прогибов плоской внешне статически неопределимой фермы//Известия КГАСУ №3(61), с.36-44,
DOI: 10.52409/20731523_2022_3_36, EDN: PRRORX

Analytical calculation of deflections of a planar externally statically indeterminate truss

M.N. Kirsanov[1]
[1]National Research University "Moscow Power Engineering Institute"
Moscow, Russian Federation

Abstract. *Problem statement*. A planar statically determinate lattice truss with a straight lower chord and a curvilinear upper chord has three movable and one fixed supports. The task is to derive a formula for the dependence of the amount of deflection of the truss and the horizontal displacement of the movable supports on the number of panels. To determine the forces in the rods and the reactions of the supports, a system of equilibrium equations for hinge joints is compiled and solved. The deflection is determined using the Mohr's integral. The generalization of analytical solutions for a number of trusses with a different number of panels to the case of an arbitrary number of panels is performed using Maple symbolic mathematics operators. The coefficients for similar expressions in the desired formula are determined from recursive equations compiled in this system based on the analysis of the sequence of solutions.
Results. It is shown that for a certain number of panels the truss has the property of instantaneous change. This is confirmed by the found distribution of the virtual velocities of the construction hinges. The actions of a uniform distributed nodal load along the curvilinear upper or lower chords and the action of a concentrated load on the middle of the span are considered. Analytical dependences of forces in the most stretched and compressed elements on the number of panels in the truss are obtained.
Conclusions. The proposed scheme of the truss, which allows obtaining the final formula for the dependence of the deflection and forces in the rods for an arbitrary number of panels. It is shown that the deflection depends abruptly on the number of panels, which makes it possible to increase the rigidity by choosing the optimal number of panels.

Keywords: truss, deflection, Maple, induction, kinematic variability

For citation: M.N. Kirsanov Analytical calculation of deflections of a flat outwardly statically indeterminate truss//News KSUAE No. 3(61), p. 36-44, DOI: 10.52409/20731523_2022_3_36, EDN: PRRORX

1. Введение

Расчет прогибов и усилий в стержнях ферм обычно производится в специализированных системах численных расчетов, основанных на методе конечных элементов [1,2]. Однако существует множество задач, для которых можно найти аналитические решения, используя принятые и хорошо зарекомендовавшие себя в расчетах ферм допущения. Стержни фермы принимаются упругими, шарниры идеальные, нагрузка прикладывается в узлах конструкции. Формулы для прогибов, усилий и смещений опор различных схем статически определимых плоских регулярных ферм при произвольном числе панелей собраны в справочниках [3,4]. Проблема существования таких схем впервые была поднята в трудах Hutchinson R.G. и Fleck N.A [5, 6]. Регулярные фермы в связи с задачей их оптимизации рассмотрены в серии работ Kaveh A. [7, 8]. Отдельные решения для плоских регулярных арок получены в работах [9–11]. Решетчатые фермы в аналитической форме исследованы в статьях [12–14]. Использованный в этих работах метод обобщения решений на произвольное число панелей может быть применен и для нахождения нижней оценки первой частоты собственных колебаний ферм [15–17].

В настоящей работе рассмотрена новая решетчатая схема фермы, не вошедшая в справочники [3, 4]. Статически определимая ферма с диагональной решеткой имеет прямолинейный нижний пояс и опирается на четыре опоры, одна из которых — неподвижный шарнир. Цель работы – исследовать конструкцию на ее кинематическую изменяемость и получить формулу зависимости от числа панелей прогиба конструкции и сдвига подвижной опоры при трех типах нагружения фермы.

Задачи исследования:

– разработать схему статически определимой фермы с четырьмя опорами;

– определить условие кинематической изменяемости конструкции и вывести аналитические зависимости прогиба и усилия в некоторых стержнях от числа панелей.

2. Материалы и методы

Симметричная ферма высотой $5h$ имеет $2n$ панелей по нижнему поясу и состоит из $n_s = 8n + 10$ стержней. В это число входят пять стержней, моделирующие опоры (рис. 1). Длина всего пролета фермы равна $L_0 = 2an.$ Раскосы не пересекаются, располагаясь условно в разных плоскостях.

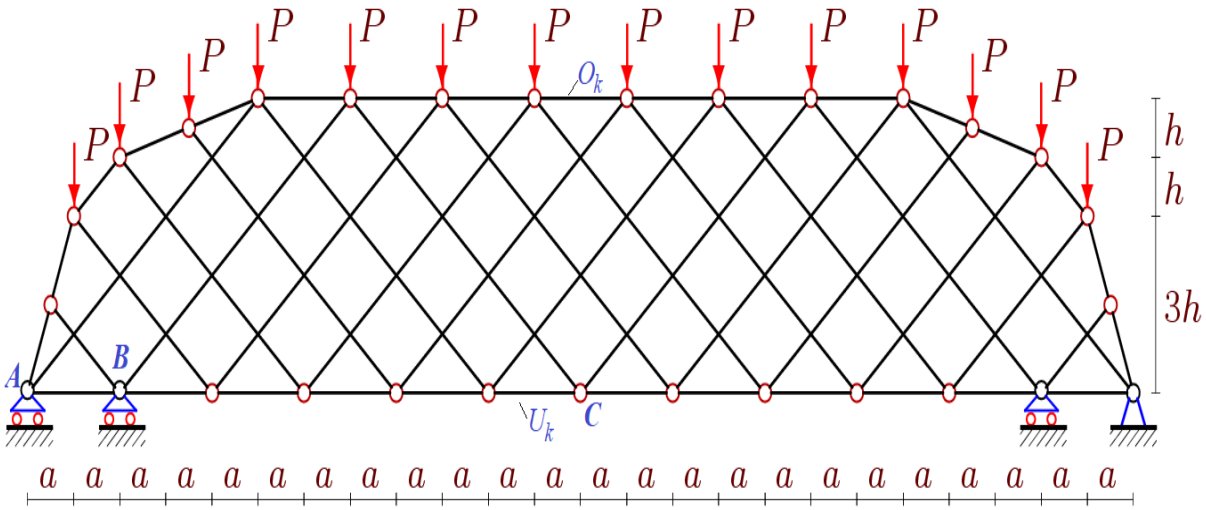


Рис. 1. Нагрузка на верхний пояс, *n*=6, (иллюстрация автора)
Fig.1.Upper chord load, *n*=6 (illustration by the authors)

Число узлов фермы $4n + 5$, суммарная длина всех стержней:

$$L = 2(4n-5)a + 4(5n-3)c + 2f + 2d,$$

где $c = \sqrt{a^2 + h^2}$, $f = \sqrt{a^2 + 9h^2}$, $d = \sqrt{9a^2 + h^2}$.

Для определения усилий в стержнях используется программа в системе компьютерной математики Maple [18], позволяющая получить решение в аналитической форме. Все узлы и стержни конструкции нумеруются (рис. 2). Начало системы координат *x-y* находится в шарнире крайней левой подвижной опоры. Координаты шарниров на нижнем поясе, например, имеют следующий вид:

$$x_i = 2(i-1)a,\ y_i = 0,\ i = 1,...,2n+1.$$

Структура соединений стержней решетки задается специальными списками, содержащими упорядоченные пары номеров узлов по концам соответствующих стержней.

Для стержней нижнего пояса списки имеют вид:

$$\bar{V}_i = [i, i+1], \quad i = 1,...,2n.$$

Стержни верхнего пояса кодируется списками:

$$\bar{V}_{2n+1} = [1, 2n+2],\ \bar{V}_{i+2n+1} = [i+2n+1, i+2n+2], \quad i = 1,...,2n+3,$$

$$\bar{V}_{4n+5} = [4n+5, 2n+1].$$

Таким же образом в циклах составляются списки кодов наклонных стержней решетки.

Система уравнений равновесия всех узлов записывается в проекциях на оси координат и имеет векторный вид: $\mathbf{G}\bar{S} = \bar{\mathbf{B}}$. Каждому узлу в системе отводится два уравнения в проекции на оси *x* и *y*. Элементы матрицы $\mathbf{G}$ системы — это направляющие

косинусы искомых усилий в стержнях и реакций опор, вычисляемые по координатам узлов и по данным списков $\bar{V}_i, i = 1,...,n_s$. В вектор правой части системы $\bar{\mathbf{B}}$ записываются величины узловых нагрузок. В четных элементах этого вектора находятся вертикальные силы, действующие на ферму, в нечетных — горизонтальные. При равномерном загружении узлов нижнего пояса: $B_{2i} = P, i = 3,..,2n-1.$ Другие компоненты вектора $\bar{\mathbf{B}}$ равны нулю. Усилия вычисляются из решения составленной системы уравнений равновесия: $\mathbf{G}\bar{S} = \bar{\mathbf{B}}$. В пакете Maple решение системы линейных уравнений, составленной в матричной форме, находится либо с помощью оператора LinearSolve из пакета LinearAlgebra, либо с использованием метода обратной матрицы. Второй вариант занимает меньше времени, что весьма существенно при анализе последовательности решений большой длины.

Случай геометрической изменяемости. Первые же расчеты усилий в ферме при разных *n* показали, что определитель системы уравнений обращается в ноль, если число панелей равно 3, 4, 5, 8, 9, 10, 13.... Равенство определителя нулю соответствует геометрической изменяемости конструкции. Для подтверждения этого факта можно составить картину виртуальных скоростей узлов (рис. 2).

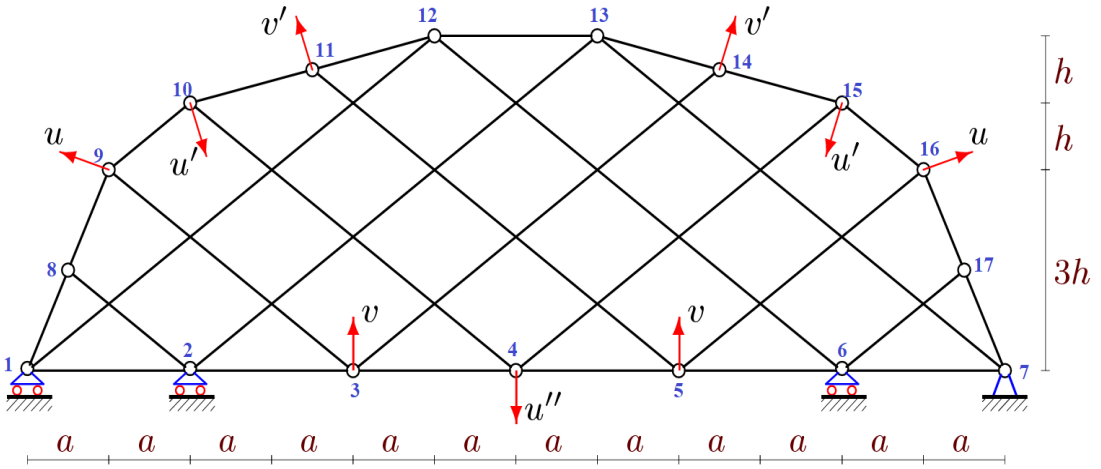


Рис. 2. Распределение виртуальных скоростей узлов, *n* = 3 (иллюстрация автора)
Fig.2. Distribution of virtual node velocities (illustration by the authors)

Большинство стержней совершают мгновенное плоское движение, некоторые вращательное, стержни 1-2, 6-7, 1-8, 7-17, 1-12, 12-6, 2-13, 13-7 остаются неподвижными. Неподвижны все четыре опорные узлы и узлы 12 и 13. Уравнения кинематики (равенства проекций векторов скоростей на отрезки стержней) дают следующие соотношения скоростей:

$$u'' = 4u'a/d, \quad u'(3a-h)/d = u(3h-a)/f, \quad vf = 4au.$$

Исключив из рассмотрения недопустимые числа панелей, введем следующую функцию: $n = (10k - 3(-1)^k + 11)/4$. При *k* = 1,2,3,... эта функция принимает значения 6, 7, 11, ... для которых ниже будут выведены зависимости усилий в критических стержнях и прогиба от числа панелей.

Численный результат расчета усилий в стержнях при a = 4 м, h =2 м, n = 6 отображен на рисунке 3. Толщина отрезков стержней условно пропорциональна модулям усилий в стержнях. Несколько нисходящих раскосных стержней при такой нагрузке остаются ненапряженными (тонкие линии без подписей). Значения усилий, отнесенные к *P*, округлены до двух значащих цифр. Основные усилия приходятся на нижний и верхний пояс, однако наиболее растянутые стержни в нижнем поясе находятся не в середине, как это можно было бы предположить.

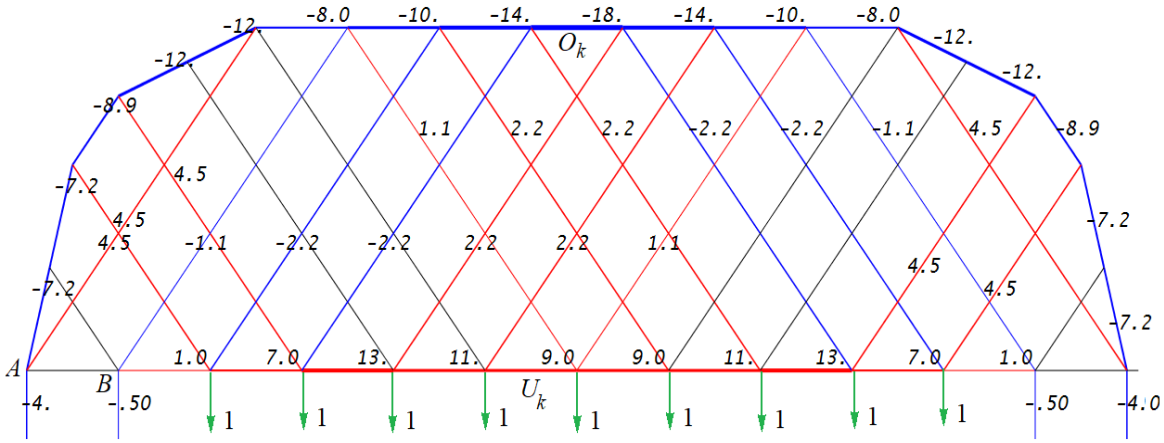


Рис. 3. Распределение усилий в стержнях от действия нагрузки на нижний пояс (иллюстрация автора)

Fig.3. Distribution of forces in the rods from the action of the load on the lower chord (illustration by the authors)

Усилия в некоторых стержнях можно найти в аналитической форме. Последовательно рассчитывая усилие в среднем стержне верхнего пояса для ферм с числом панелей $k = 1,2,3,...,$ получим следующий ряд значений этого усилия:

$$O_1 = -9Pa / h,\ O_2 = -8Pa / h,\ O_3 = -28Pa / h,\ O_4 = -25Pa / h,...$$

Оператор rgf_findrecur системы Maple из специального пакета genfunc дает однородное линейное рекуррентное уравнение, которому удовлетворяет общий член этой последовательности:

$$O_k = O_{k-1} + 2O_{k-2} - 2O_{k-3} - O_{k-4} + O_{k-5}.$$

Для работы оператора rgf_findrecur требуется четное число членов последовательности. В данной задаче минимальная длина последовательности, у которой можно найти общий член, равна десяти.

Решить это уравнение и получить общий член последовательности можно с помощью оператора rsolve:

$$O_k = -Pa(10k^2 + 2(11 - 7(-1)^k)k - 9(-1)^k + 17) / (8h).$$

Аналогично находятся и зависимости от числа панелей усилие в стержне на нижнем поясе и реакции опор:

$$U_k = Pa(10k^2 + 2(9 - (-1)^k)k - 5(-1)^k + 1) / (8h),$$
$$Y_A = P(4k - (-1)^k + 3) / 2,\ Y_B = P(2k - (-1)^k - 1) / 4.$$

Прогиб и смещение опоры. Прогиб фермы свяжем с вертикальным смещением среднего узла (шарнира) C нижнего прямолинейного пояса. Для вычисления прогиба используется интеграл Мора в виде:

$$\Delta = \sum_{j=1}^{n_s - 5} N_j \tilde{N}_j l_j / (EF), \quad (1)$$

где E — модуль упругости материала стержней, F — площадь поперечного сечения стержней, N_j — усилия в стержне с номером j от действия приложенной нагрузки, $\tilde{N}_j$ — усилие от единичной (безразмерной) вертикальной силы, приложенной к узлу C, l_j — длина стержня. Пять стержней, моделирующие опоры, приняты недеформируемыми и их усилия в сумму интеграла Мора не входят.

3. Результаты

Рассмотрим вертикальную нагрузку, равномерно распределенную по узлам верхнего пояса (рис. 1). Последовательность выражений для прогиба, вычисленного по формуле (1) для k=1,2,3.. имеет вид:

$$\Delta_1 = P(122a^3 + 5c^3)/(h^2EF),$$
$$\Delta_2 = P(2648a^3 - 40c^3 + 7d^3 + 12f^3)/(8h^2EF),$$
$$\Delta_3 = 4P(404a^3 + 5c^3)/(h^2EF),$$
$$\Delta_4 = P(23464a^3 + 48c^3 + 15d^3 + 20f^3)/(8h^2EF),$$
$$\Delta_5 = 3P(2558a^3 + 15c^3)/(h^2EF),...$$

В общем случае:

$$\Delta_k = P(C_1a^3 + C_2c^3 + C_3d^3 + C_4f^3)/(h^2EF). \quad (2)$$

Также как и при выводе формул для усилий и реакций опор коэффициенты в этой формуле определяются индукцией с использованием операторов rgf_findrecur и rsolve системы Maple:

$$C_1 = (250k^4 + 4(263 - 35(-1)^k)k^3 + 2(823 - 255(-1)^k)k^2 + \\ + 4(229 - 205(-1)^k)k - 333(-1)^k + 189)/48,$$
$$C_2 = (10k^2 + 2(1 - 9(-1)^k)k - 29(-1)^k - 19)/8,$$
$$C_3 = (4((-1)^k + 1)k - (-1)^k - 1)/16,$$
$$C_4 = (k+1)(1 + (-1)^k)/4.$$

Аналогично, при загружении узлов с номерами 3,..., n–1 нижнего пояса результат будет иметь вид (2) с коэффициентами:

$$C_1 = (250k^4 + 4(263 - 35(-1)^k)k^3 + 2(745 - 243(-1)^k)k^2 + \\ + 8(89 - 83(-1)^k)k - 195(-1)^k + 147)/48,$$
$$C_2 = (10k^2 + 2((-1)^k + 11)k + 27(-1)^k + 37)/8, \quad (3)$$
$$C_3 = C_4 = (k+1)((-1)^k + 1)/4.$$

Коэффициенты в (2) при действии на ферму сосредоточенной силы, приложенной к узлу *C,* имеют вид:

$$C_1 = (20k^3 + 6((-1)^k + 11)k^2 + 14(3(-1)^k + 8)k - 21(-1)^k + 9)/12,$$
$$C_2 = (10((-1)^k + 2)k + 11(-1)^k + 21)/4,$$
$$C_3 = C_4 = ((-1)^k + 1)/4.$$

Разработанная математическая модель фермы для расчета прогибов позволяет легко перенастроить ее на расчет других деформаций. Например, при действии на ферму вертикальных нагрузок подвижные опоры сдвигаются по горизонтали. Для расчета этих деформаций по формуле (1) под усилиями $\tilde{I}_J$ следует понимать усилия от единичной горизонтальной силы, приложенной к левой подвижной опоре *A*. В этом случае решение задачи о сдвиге δ опоры под действием вертикальной нагрузки, распределенной по нижнему поясу, может быть получено также индукцией:

$$\delta = Pa^2(k+1)(50k^2 + (103 - 45(-1)^k)k + 18 - 30(-1)^k)/(6hEF). \quad (4)$$

Рассмотрим пример решения по формуле (2) с коэффициентами (3) в случае нагружения нижнего пояса. Обозначим значение суммарной нагрузки, действующей на ферму, $P_0 = P(2n-3)$. Графики зависимости безразмерного прогиба $\Delta' = \Delta EF/(P_0 L_0)$ от числа панелей при длине пролета $L_0 = 50м$ построены на рисунке 4. Характерны скачкообразные изменения прогиба при изменении числа панелей. Для малого числа панелей перепад значений прогиба достигает 50%. Это дает широкие возможности для оптимизации конструкции. Изменение числа панелей всего на одну может существенно увеличить или уменьшить жесткость конструкции. При увеличении числа панелей кривые изменения прогиба сглаживаются, колеблясь около некоторой, почти не меняющейся, средней величины. Асимптотика этих быстро осциллирующих зависимостей не выявляется. Такой тип зависимости прогиба от числа панелей характерен для решетчатых ферм [13, 14] и объясняется наличием в решении слагаемых с коэффициентом $(-1)^k$, зависящим от четности числа панелей.

Для решения (4) задачи о сдвиге имеется горизонтальная асимптотика:

$$\lim_{k\to\infty} \delta EF/(P_0 L_0) = L_0/(15h).$$

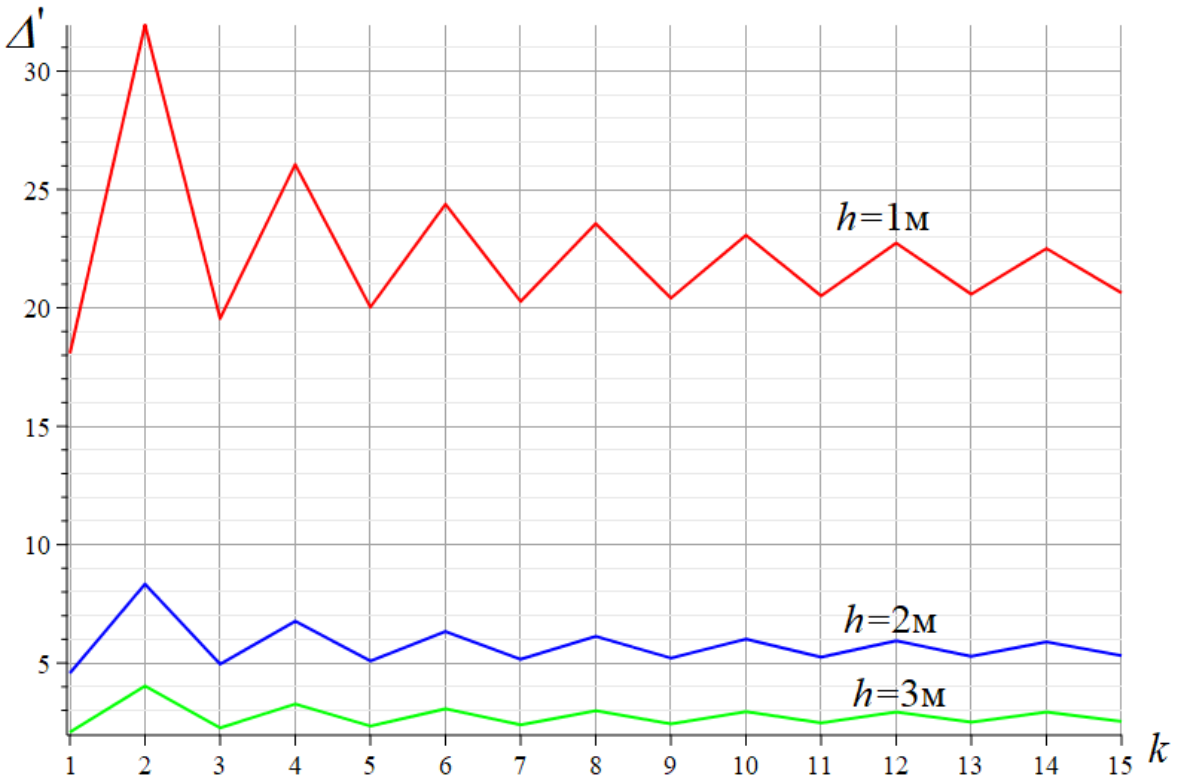


Рис. 4. Зависимость прогиба от числа панелей, (иллюстрация автора)
Fig.4.Dependence of the deflection on the number of panels (illustration by the authors)

Предложенная схема статически определимой регулярной фермы допускает аналитическое решение задачи о прогибе для произвольного числа панелей. При этом схема имеет скрытое и опасное свойство — при определенном числе панелей ферма становится кинематически изменяемой. Этот пример показывает, необдуманный перенос готового решения на ферму с измененным числом панелей может привести к ошибке. Например, фермы при n = 12 и n =13 внешне почти неотличимы, однако в первом случае ферма неизменяема, а во втором конструкция имеет свойство мгновенно изменяемого механизма, что не дает возможность использовать ее как несущую конструкцию. В численных расчетах эта особенность не проявляется за счет неизбежных погрешностей округления. Определитель системы уравнений равновесия при численном расчете близок к нулю, но в ноль не обращается, и кинематического вырождения можно не заметить.

4. Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработана схема статически определимой фермы с четырьмя опорами. Дополнительные опоры снимают в какой-то степени концентрацию напряжений по концам фермы.
2. Определено условие кинематической изменяемости конструкции. Для подтверждения этого эффекта приведена схема возможных скоростей.
3. Выведены аналитические зависимости прогиба и усилия в некоторых стержнях от числа панелей.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фундаментальные и прикладные исследования космоса».

Список литературы/ References

1. Kuznetsov I., Salakhutdinov M., Shakirzyanov F., Khaydarov L., Aripov D. Aan investigation of the influence of the reduced elasticity modulus on strength of pultruded frp members in bending // Iop conference series. Materials Science and Engineering. Kazan, Russia, 2020. С. 012047.
2. Volovitskaya A., Salakhutdinov M., Kuznetsov I. Investigation and calculation of a composite arch construction // E3S Web of Conferences. Сер. "International Scientific Conference "Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering, CONMECHYDRO 2021" 2021. 2067.
3. Kirsanov M. Trussed Frames and Arches: Schemes and Formulas. Newcastle upon Tyne, GB: Cambridge Scholars Publishing Lady Stephenson Library, 2020. 178 с.
4. Kirsanov M. Planar Trusses: Schemes and Formulas. Newcastle upon Tyne, GB: Cambridge Scholars Publishing Lady Stephenson Library, 2019. 198 с.
5. Hutchinson R.G., Fleck N.A. Microarchitectured cellular solids – The hunt for statically determinate periodic trusses // ZAMM Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik. 2005. № 9(85). С. 607–617. DOI:10.1002/zamm.200410208.
6. Hutchinson R.G., Fleck N.A. The structural performance of the periodic truss // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2006. № 4(54). с. 756–782. DOI:10.1016/j.jmps.2005.10.008.
7. Kaveh A., Zolghadr A. Meta-heuristic methods for optimization of truss structures with vibration frequency constraints. № 10(229)Springer-Verlag Wien, 01.10.2018.
8. Kaveh A., Mahdavi V.R. Colliding-Bodies Optimization for Truss Optimization with Multiple Frequency Constraints // Journal of Computing in Civil Engineering. 2015. № 5(29). С. 04014078. DOI:10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000402.
9. Rakhmatulina, A.R., Smirnova A.A. The dependence of the deflection of the arched truss loaded on the upper belt, on the number of panels // Science Almanace. 2017. № 2–3(28). с. 268–271. DOI:10.17117/na.2017.02.03.268.
10. Voropay, R., Domanov E. Analytical solution of the problem of shifting a movable support of a truss of arch type in the Maple system // Postulat. 2019. (1).
11. Kazmiruk I.Y. On the arch truss deformation under the action of lateral load // Science Almanac. 2016. № 3–3(17). с. 75–78. DOI:10.17117/na.2016.03.03.075.
12. Tinkov D. V. Comparative analysis of analytical solutions to the problem of truss structure deflection // Magazine of Civil Engineering. 2015. № 5(57). с. 66-73. DOI:10.5862/MCE.57.6.
13. Ilyushin A.S. The formula for calculating the deflection of a compound externally statically indeterminate frame // Structural mechanics and structures. 2019. № 3(22). с. 29–38.
14. Dai Q. Analytical Dependence of Planar Truss Deformations on the Number of Panels // AlfaBuild. 2021. (17). DOI:10.34910/ALF.17.1.
15. Kirsanov M. Deformations And Spatial Structure Vibrations Frequency of The Rectangular Contour Type Cover: Analytical Solutions // AlfaBuild. 2021. (98). с. 9805. DOI:10.4123/CUBS.98.5.
16. Petrenko V.F. The natural frequency of a two-span truss // AlfaBuild. 2021. № 20. с. 2001.

DOI:10.34910/ALF.20.1.
17. Vorobev O.V. Bilateral Analytical Estimation of the First Frequency of a Plane Truss // Construction of Unique Buildings and Structures. 2020. № 7(92). c. 9204–9204. DOI:10.18720/CUBS.92.4.
Buka-Vaivade K., Kirsanov M.N., Serdjuks D.O. Calculation of deformations of a cantilever-frame planar truss model with an arbitrary number of panels // Vestnik MGSU. 2020. № 4(4). С. 510–517. DOI:10.22227/1997-0935.2020.4.510-517.

Информация об авторе

Михаил Николаевич Кирсанов, доктор физико-математических наук, профессор Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт», Москва, Российская Федерация
E-mail: c216@ya.ru

Information about the authors.

Mikhail N. Kirsanov, doctor of physical-mathematical sciences, professor of National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation
E-mail: c216@ya.ru

УДК: 699.86
DOI: 10.52409/20731523_2022_3_45
EDN: JDAYJE

К вопросу оценки переувлажнения конструкций в местах теплотехнических неоднородностей

А.С. Петров[1], А.М. Юзмухаметов[1], А.И. Иванцов[1]
[1]Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* В действующих нормативных документах (СП 50.13330 и ISO 13788) учёт защиты от переувлажнения выполняют по глади конструкции, то есть в теплотехнически однородных частях ограждения. Требование защиты от переувлажнения неоднородных узлов отсутствует. Вместе с тем, натурные и численные исследования показывают, что во многих случаях переувлажнение происходит именно в местах теплотехнической неоднородности. Поэтому не учет данной проблемы на этапе проектирования может привести к потере теплофизических свойств конструкций и их долговечности. Качественная оценка степени увлажнения теплотехнической неоднородности становится доступной широкому кругу инженеров в связи с появлением специализированного программного обеспечения (ПО). Однако остаются неясными вопросы как самого метода подобного расчета, так и трактовки полученных результатов. Таким образом целью исследования является оценка действующих методов определения влажностного состояния ограждающих конструкций на примере типового узла теплотехнической неоднородности.
Результаты. Приведены результаты численного исследования влажностного состояния фрагмента ограждения на основе программного комплекса с двухмерным переносом парообразной влаги по Г. Глазеру. По полученным полям влажности уточнены расчетные величины теплопроводности по сечению фрагмента. Приведен пример оценки переувлажнения конструкции, разработанный на основе упрощенных стационарных методов Г. Глазера, а также Сафина И.Ш. и Куприянова В.Н.
Выводы. Показано, что выполнение требований по защите от переувлажнения однородного фрагмента конструкции согласно п.8 СП 50.13330 недостаточно, в дополнение к существующим расчетам необходима оценка возможного переувлажнения в местах теплотехнической неоднородности. Предложен альтернативный метод оценки влажностного состояния конструкций от переувлажнения в местах теплотехнической неоднородности, разработанный на основе методов Г. Глазера, И. Ш. Сафина и В. Н. Куприянова.

Ключевые слова: конструкции наружных стен, температурно-влажностное состояние, конденсация, поля влажности, теплотехническая неоднородность.

Для цитирования: А.С. Петров, А.М. Юзмухаметов, А.И. Иванцов К вопросу оценки переувлажнения конструкций в местах теплотехнических неоднородностей // Известия КГАСУ, 2022 ,№3 (61), с. 45-55, DOI:10.52409/20731523_2022_3_45, EDN: JDAYJE

Assessing overmoistening of structures in places of heat engineering inhomogeneities

A.S. Petrov[1], A.I. Ivantsov[1], A.M. Yuzmukhametov[1]
[1]Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Abstract: In existing regulatory documents (SP 50.13330 and ISO 13788), overmoistening protection is taken into account along the surface of the structure, that is, in thermally homogeneous parts of the enclosure. There is no requirement for protection against overmoistening of inhomogeneous nodes. At the same time, field and numerical studies show that in many cases overmoistening occurs precisely in places of thermal inhomogeneity. A qualitative assessment of the degree of moistening of thermal inhomogeneity becomes available to a wide range of engineers in connection with the advent of specialized software. However, the questions of both the method of such a calculation and the interpretation of the results obtained remain unclear.
The results of a numerical study of the moisture state of the enclosure fragment based on a software package with a two-dimensional transfer of vaporous moisture according to G. Glaser are presented. Based on the moisture fields obtained, the calculated values of thermal conductivity over the fragment cross section were refined. An example of assessing overmoistening of a structure based on simplified stationary methods by G. Glaser, Safin I.Sh. and Kupriyanov V.N.is given.
It is shown that the fulfillment of the requirements for protection against overmoistening of a homogeneous fragment of a structure in accordance with paragraph 8 of SP 50.13330 is not enough, in addition to existing calculations, it is necessary to assess possible moistening in places of heat engineering heterogeneity. The alternative method for protecting structures from moistening in places of heat engineering heterogeneity is proposed based on the methods of G. Glaser, I. Sh. Safin and V.N. Kupriyanov.

Key words: external wall structures, temperature and humidity conditions, condensation, humidity fields, heat engineering inhomogeneity.

For citation: Petrov A.S., Juzmuhametov A. M., IvantsovA. I. Assessing overmoistening of structures in places of heat engineering inhomogeneities // News KSUAE, 2022, №3 (61), pp. 45-55, DOI: 10.52409/20731523_2022_3_45, EDN: JDAYJE

1. Введение

Представление о влажности материальных слоев ограждающих конструкций зачастую играет решающую роль при обеспечении тепловой защиты зданий, защиты ограждений от переувлажнения, коррозии металлических деталей и т.п. От значений расчетной эксплуатационной влажности материалов зависят величины теплопроводности (λ) и паропроницаемости (μ) [1], которые применяются в стандартах стационарного [СП 50.13330, ISO 13788] и нестационарного [ГОСТ 32494, BS EN 15026] методов оценки влажностного состояния конструкций. На этапе проектирования инженеру необходимо знать как величину эксплуатационной влажности материалов, так и обеспечить защиту от их переувлажнения. Эксплуатационная влажность материалов ограждающих конструкций уточнялась и обобщалась с 60х годов [2, 3] по настоящее время, согласно НИИСФ РААСН [4] и других [5–8]. Здесь стоит отметить, что таким образом были получены величины эксплуатационной влажности для однородных фрагментов наружных стен. Расчетная эксплуатационная влажность в местах стыков различных элементов, откосах и других теплотехнических неоднородностях изучена в гораздо меньшей степени, как и вопрос их защиты от переувлажнения. Стандартный расчет защиты от переувлажнения согласно п.8 СП 50.13330 выполняется для однородной части стены и не учитывает теплотехнические неоднородности в оболочке здания. Существует опасение, что развитие стандартной методики защиты от переувлажнения [9–11] в этом плане может оказаться тупиковым так как введенные авторами абстрактные математические понятия как $f_{t.м.y.}$ и набор правил определения «плоскости максимального

увлажнения» справедливы только для простых однородных фрагментов стен, а их применение в области неоднородных узлов конструкций невозможно или приведет к существенному увеличению справочных таблиц и абстрактных правил. Данный подход согласно СП 50.13330 не позволяет прогнозировать даже качественную картину увлажнения конструкций в ее неоднородных фрагментах, не говоря уже об обеспечении защиты от переувлажнения. В качестве альтернативы продолжают активно разрабатываться инженерные методы оценки переувлажнения, не требующие комплексных и трудоемких расчетов [12–14]. При этом данные методы свободны от абстрактных понятий и базируются на ясных принципах возникновения конденсата, а их применение вкупе с программным обеспечением с учетом двухмерного переноса парообразной влаги по сечению фрагмента позволит решить указанные выше проблемы.

Таким образом, в настоящем исследовании поставлены следующие задачи:

1. Оценить действующие стандартные методы защиты конструкций от переувлажнения с точки зрения учета увлажнения материалов в местах теплотехнической неоднородности.

2. Разработать упрощенный стационарный метод определения степени увлажнения теплотехнически неоднородных узлов конструкций.

3. Дать сравнительный анализ результатов расчета количества конденсированной влаги в ограждениях по нормативной литературе.

4. Оценить действующий стандартный метод определения расчетной теплопроводности материалов ограждающих конструкций на этапе проектирования.

2. Материалы и методы

Объектом исследования выбран типовой узел примыкания плиты перекрытия к наружной стене, рисунок 1.

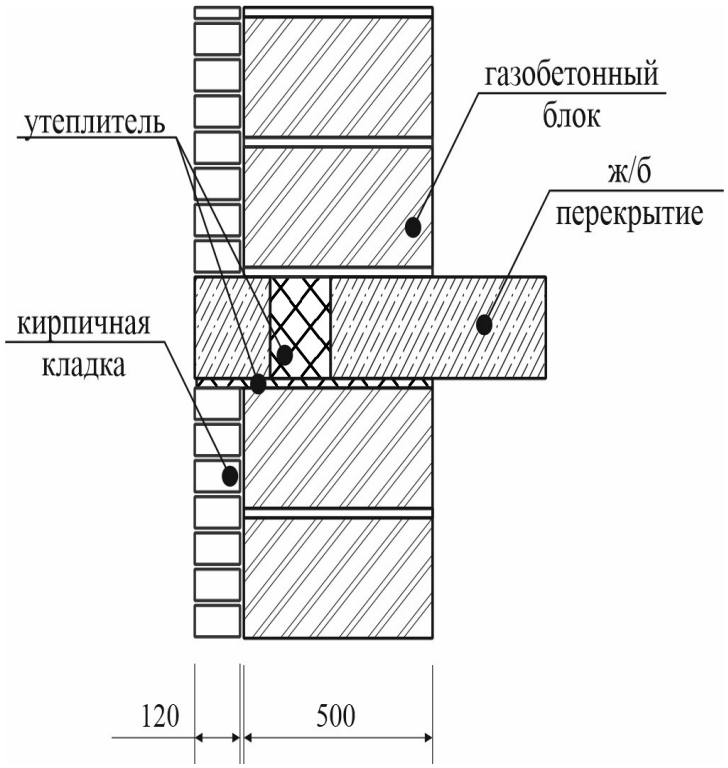


Рис. 1: Узел теплотехнической неоднородности. Примыкание плиты перекрытия к наружной стене (иллюстрация авторов)

Fig. 1: Construction fragment of thermal inhomogeneity. Adjacency of the floor slab to the outer wall (illustration by the authors)

Граничные условия определены для климатических условий города Казани. Теплофизические характеристики материалов, используемые в конструкции указаны в таблице 1.

Таблица 1

Материал	ρ, кг/м^3	λ_A, Вт/м·°С	μ^*	δ, мм
Железобетон	2500	1,92	80	220
Термовкладыш «Технофас»	160	0,042	2,4	160
Газобетон	400	0,14	3,13	500
Цементно-песчаный раствор	1800	0,76	8	10
Кирпичная кладка	1800	0,70	6,5	120
*Примечание – величина паропроницаемости μ дана в относительных величинах, как отношение паропроницаемости воздуха $\mu_в$ к паропроницаемости материала, где $\mu_в$ = 0,72 мг/м·ч·Па				

Для оценки влажностного состояния узла конструкции предложен упрощенный стационарный метод определения степени увлажнения теплотехнически неоднородных узлов конструкций на основе методов Г. Глазера, И. Ш. Сафина и В. Н. Куприянова. Суть метода сводится к определению двухмерного влажностного поля по сечению конструкции с последующим расчетом температуры начала конденсации, что позволяет определить местоположение конденсата в узле конструкции и количество конденсата за период влагонакопления.

Для анализа влажностного состояния узла конструкции использовалась программа двухмерного моделирования переноса тепла и водяного пара HTflux. Алгоритм программного обеспечения (ПО) базируется на расчете двухмерного перемещения парообразной влаги по сечению конструкции без учета перемещения жидкой влаги. С помощью данного ПО были получены температуры начала конденсации, поля относительной и конденсированной влаги по сечению конструкции, включая количество конденсата в сутки.

По методу [13, 15] определены температуры начала конденсации в однородном фрагменте конструкции $t_{нк}$ и сопоставлены с результатом компьютерного анализа HTflux. Продолжительность конденсации водяного пара в заданных климатических условиях определялась путем сопоставления величины $t_{нк}$ ограждающей конструкции с годовым ходом температуры наружного воздуха [13].

С целью определения весовой влажности материальных слоев конструкции использовались справочные данные значений сорбционных влажностей материалов, таблица 2.

Таблица 2

Значения сорбционных влажностей материалов

Отн. влаж. воздуха, φ, %	Влажность по массе, $w_м$, %/по объёму, w_o, %									
	Ж/б		Газобетон		ЦП раствор		Кирпич керамический		Мин. вата	
	2500 кг/м^3		400 кг/м^3		1800 кг/м^3		1800 кг/м^3		160 кг/м^3	
	$w_м$	w_o	$w_м$	w_o	$w_м$	w_o	$w_м$	w_o	$w_м$	w_o
10	0,15	0,375	1,1	0,44	0,5	0,9	0,01	0,017	0,07	0,007
20	0,3	0,75	1,8	0,72	0,9	1,62	0,03	0,051	0,1	0,01
30	0,4	1	2,1	0,84	1,1	1,98	0,04	0,068	0,15	0,015
40	0,45	1,125	2,3	0,92	1,3	2,34	0,05	0,085	0,2	0,02
50	0,55	1,375	2,5	1	1,5	2,7	0,07	0,119	0,25	0,025
60	0,7	1,75	2,7	1,08	1,8	3,24	0,1	0,17	0,3	0,03
70	0,8	2	3,0	1,2	2,1	3,78	0,16	0,272	0,35	0,035
80	0,9	2,18	3,6	1,44	2,7	4,86	0,24	0,408	0,6	0,06
90	1	2,5	5,5	2,2	3,2	5,76	0,36	0,612	0,8	0,08
97	1,14	2,85	10,4	4,16	3,76	6,77	0,49	0,833	1,25	0,125
100	1,2	3	12,5	5	4	7,2	0,55	0,935	1,45	0,145
$w_в$, w_o – весовая и объемная влажность материала, %										

Определение расчетных величин теплопроводности в зависимости от влажности материала выполнялось на основе исследований Кауфмана согласно:

$$\Delta\lambda = \Delta w_0 \cdot m, \quad (1)$$

где Δw_0 – приращение объемной влажности материала, m – процент увеличения теплопроводности материала на 1 % объемной влажности. Величина m для минеральной ваты плотностью 150 кг/м^3 равна m=6,6 %; для газобетона плотностью 400 кг/м^3 – 15 %;

для бетона плотностью 2500 кг/м^3 – 6,3 %, для керамического кирпича плотностью 1700 кг/м^3 – 7,35 %; для цементно-песчаного раствора плотностью 1800 кг/м^3 – 7,1 %.

3. Результаты

Температура начала конденсации в рассматриваемом узле оказалась равной 4,7 °С. Конденсат образуется между наружной поверхностью термовкладыша и железобетонным перекрытием, как показано флажком на рисунке 2.

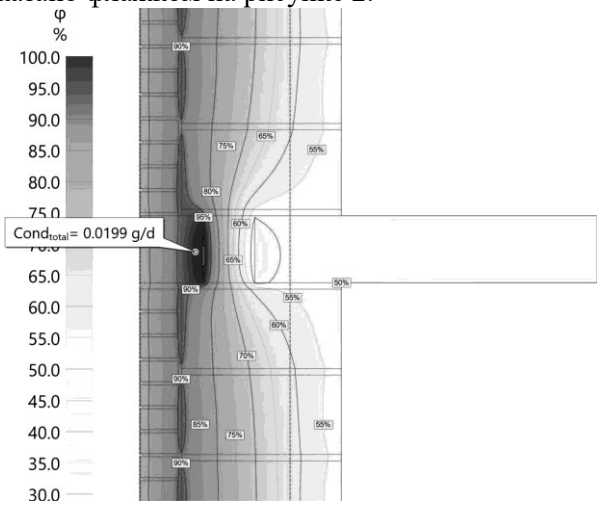


Рис. 2: Поля влажности. Флажком указано место начала конденсации (иллюстрация авторов)
Fig. 2: Humidity fields. The flag indicates the place where condensation began (illustration by the authors)

Таким образом, можно видеть, что первоначально конденсат образуется не в однородном участке стены, а в теплотехнической неоднородности, что невозможно определить по стандартному методу СП 50.13330. Период влагонакопления определен как период со среднемесячными температурами наружного воздуха ниже 4,7 °С, соответственно, что для Казани составило по климатическим данным около 150 суток. Результаты расчета характеристик периода влагонакопления сведены в таблицу 3.

Таблица 3
Граничные условия для г. Казани и результаты расчета в теплотехнической неоднородности узла конструкции

Температура внутреннего воздуха $t_в$, °С	Температура наружного воздуха $t_н$, °С	Относит. влажность внутреннего воздуха $\varphi_в$, %	Относит. влажность наружного воздуха $\varphi_н$, %	Температура начала конденсации $t_{нк}$, °С	Период влагонакопления для условий Казани, суток
20	4,7	50	80	4,7	150

Температура начала конденсации в однородной части узла оказалась равной 1,5 °С, рисунок 3. Конденсат образуется на стыке между газоблоком и наружной кирпичной кладкой.

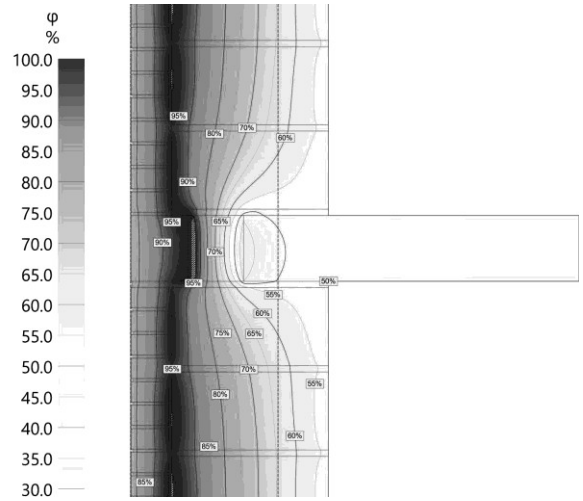


Рис. 3: Поля влажности. Момент начала конденсации в однородной части стены. (иллюстрация авторов)

Fig. 3: Humidity fields. Moment of the beginning of condensation in a homogeneous part of the wall. (authors illustration)

При этом можно видеть, что плоскость конденсации между термовкладышем и плитой перекрытия при данной температуре (1,5°С) представляет собой уже зону конденсации. Период влагонакопления определен как период со среднемесячными температурами наружного воздуха ниже 1,5 °С, соответственно, что для Казани составило по климатическим данным около 120 суток. Результаты расчета характеристик периода влагонакопления сведены в таблицу 4.

Таблица 4

Граничные условия для г. Казани и результаты расчета в теплотехнической неоднородности узла конструкции

Температура внутреннего воздуха $t_в$, °С	Температура наружного воздуха $t_н$, °С	Относит. влажность внутреннего воздуха $\varphi_в$, %	Относит. влажность наружного воздуха $\varphi_н$, %	Температура начала конденсации $t_{нк}$, °С	Период влагонакопления для условий Казани, суток
20	1,5	50	80	1,5	120

Расчет степени увлажнения материалов определялся в приложении HTflux для железобетонной плиты и газобетонного блока. Количество конденсата определяется программным приложением по традиционному методу Г. Глазера согласно выражению:

$$G = \frac{e_в - E_к}{R_{пв}} - \frac{E_к - e_н}{R_{пн}}, \text{ мг/м}^2\text{ч} \quad (2)$$

где $e_в$ и $e_н$ – парциальное давление внутреннего и наружного воздуха соответственно, Па; $E_к$ – парциальное давление в плоскости конденсации, Па; $R_{пв}$ и $R_{пн}$ – величина сопротивления паропроницанию внутренней части конструкции до плоскости конденсации и величина сопротивления паропроницанию наружной части конструкции, соответственно, м^{2}чПа/мг.

Величина приращения весовой влажности в материалах Δw, % определялась по выражению:

$$\Delta w = \frac{g}{\rho \cdot V} \cdot 100, \% \quad (3)$$

где g – количество конденсата, выпадающего в одном квадратном метре конструкции за весь период влагонакопления, кг/м^2; ρ – плотность материала при 100% сорбционном увлажнении, кг/м^3; V – объем одного квадратного метра увлажняемой части конструкции, м^3.

Результаты расчетов сведены в таблицу 5.

Таблица 5

Характеристики увлажнения материалов конструкции за период влагонакопления и соответствие требованиям нормативной литературы

	железобетон	газобетон
период влагонакопления, сут	150	120
G, г/м^{2}сут	3,67	2,69
g, кг/м^2	0,55	0,32
d, м толщина увлажняемого слоя (определена графически по HTflux)	0,01	0,02
Δw,%	2,17	2,86
соответствие требованиям СП 50.13330	не соответствует 2,17>2,0	соответствует 2,86<6,0
соответствие требованиям ISO 13788	не соответствует 550 г/м^2 > 200 г/м^2	не соответствует 320 г/м^2 > 200 г/м^2

4. Обсуждение

Анализ результатов показывает, что приращение весовой влажности в увлажняемом участке железобетонной плиты превышает нормативную величину на 2,0 % согласно п.8 СП 50.13330, в то время как весовая влажность газобетона находится в пределах нормы. Данный факт может указывать на непригодность данного конструктивного решения в условиях эксплуатации Казани с точки зрения защиты от переувлажнения. Стоит также отметить и различия в трактовке полученных результатов в нормативной литературе. Согласно ISO 13788 максимально допустимое количество влаги за период влагонакопления не должно превышать 200 г/м^2 вне зависимости от вида материала. В рассмотренных материалах конструкции количество конденсата превышает эту величину. Следовательно, однородная часть конструкции удовлетворяет требованиям СП 50.13330, но не удовлетворяет требованиям ISO 13788.

Здесь стоит отметить, что использованный метод расчета имеет тенденцию к завышению получаемых результатов, так как степень увлажнения определена для стационарного процесса конденсации. Также метод Г. Глазера применим преимущественно для плоскостей конденсации. Если в конструкции появляется зона конденсации, то определение количества конденсата по выражению (2) может дать существенное завышение результатов. Вместе с тем, выполненный пример расчета наглядно демонстрирует качественную картину и указывает на необходимость защиты от переувлажнения не только однородных фрагментов наружных стен, но и узлов теплотехнической неоднородности.

Для анализа расчетных величин теплопроводности материалов был выполнен расчет весовой влажности каждого сегмента конструкции при средней температуре наиболее холодного месяца (−11,6 °С), рисунок 4.

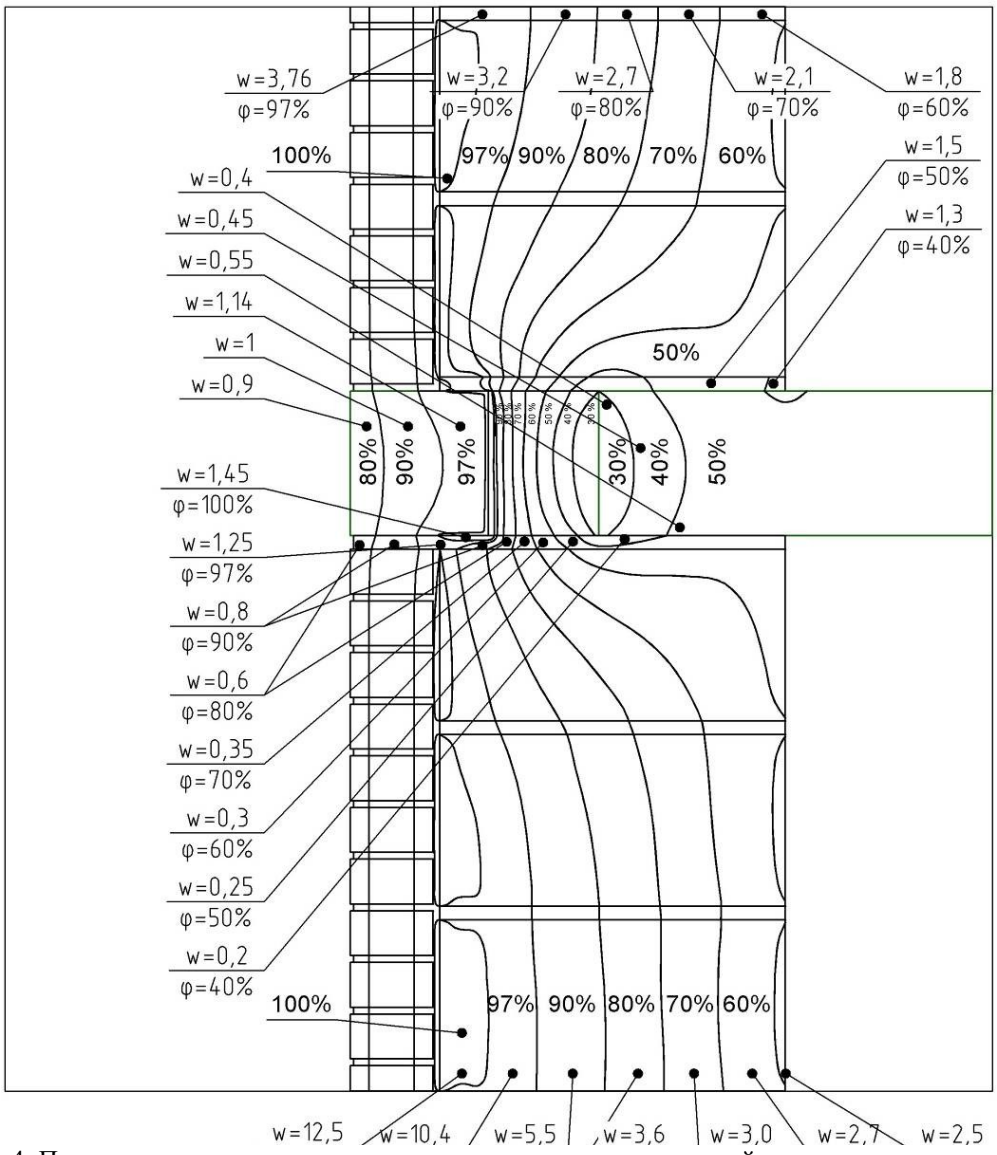


Рис. 4: Поля влажности по сечению конструкции с указанием весовой влажности для каждого сегмента. Каждый сегмент подписан величиной весовой и относительной влажности, % (иллюстрация авторов)

Fig. 4: Humidity fields along the structure section with indication of weight moisture content for each segment. Each segment is signed by weight and relative humidity, % (illustration by the authors)

Можно видеть, что распределение влажности по сечению конструкции неравномерное, что может повлиять на величину расчетной теплопроводности материалов. Для каждого сегмента конструкции по выражению (1) были определены и усреднены величины теплопроводности материалов. Для оценки величин расчетной теплопроводности удобно воспользоваться таблицей 6, где они представлены в зависимости от весовой влажности. Сравнение расчетных величин теплопроводности (столбец 5) со справочными величинами (столбцы 6 и 7), позволяет говорить лишь о некоторой согласованности этих величин. Так, расчетная теплопроводность железобетона и газобетона оказалось несколько выше справочных значений, в то время как эти величины для кирпичной кладки и утеплителя оказались несколько заниженными. Данные результаты демонстрируют неопределенность в данном вопросе, что может привести к погрешности вычислений при применении справочных величин теплопроводности, которые представлены в СП 50.13330 как $\lambda_А$ и $\lambda_Б$, соответственно. Следовательно, существует необходимость научного развития метода определения расчетной теплопроводности ограждающих конструкций на этапе проектирования.

Таблица 6

Оценка величины теплопроводности материалов узла конструкции с учетом полей влажности

1	2	3	4	5	6	7
Материал	Сегмент поля по отн. влажности %	$w_{ср}$ сегмента, %	λ_i сегмента, Вт/(м·ºС)	$\lambda_{пр}$, Вт/(м·ºС) Средняя	$\lambda_{пр}$, Вт/(м·ºС) А	$\lambda_{пр}$, Вт/(м·ºС) Б
Железобетон $w_А$=2 %; $w_Б$=3 %	30	0.4	1,8	2,02	1,92	2,04
	40	0.45	1,81			
	50	0.55	1,84			
	80	0.872	1,92			
	90	1	1,96			
	97	1.14	1,99			
	100	4	2,75			
Газобетон $w_А$=8 %; $w_Б$=12 %	40	2.3	0,13	0,17	0,14	0,15
	50	2.5	0,13			
	60	2.7	0,13			
	70	3	0,13			
	80	3.6	0,13			
	90	5.5	0,15			
	97	10.4	0,18			
	100	15,36	0,21			
Рас-р цем.-песчаный $w_А$=2 %; $w_Б$=4 %	40	1.3	0,68	0,8	0,76	0,93
	50	1.5	0,69			
	60	1.8	0,71			
	70	2.1	0,74			
	80	2.7	0,78			
	90	3.2	0,82			
	97	3.7	0,86			
	100	4	0,88			
Кир. кл. $w_А$=1%; $w_Б$=2%	80	0.24	0,58	0,585	0,7	0,81
	90	0.36	0,59			
	97	0.49	0,59			
Мин. вата $w_А$=2 %; $w_Б$=5 %	30	0.15	0,0360	0,0361	0,042	0,045
	40	0.2	0,0360			
	50	0.25	0,0361			
	60	0.3	0,0361			
	70	0.35	0,0361			
	80	0.6	0,0361			
	90	0.8	0,0362			
	97	1.25	0,0363			
	100	1.45	0,0363			

5. Заключение

На основании выполненных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Существующие стандартные методы защиты конструкций от переувлажнения (СП 50.13330) требуют научного развития, так как не учитывают увлажнение материалов в местах теплотехнической неоднородности.

2. Предложен упрощенный стационарный метод определения степени увлажнения теплотехнически неоднородных узлов конструкций на основе методов Г. Глазера, И. Ш. Сафина и В. Н. Куприянова. Метод заключается в определении двухмерного влажностного поля по сечению конструкции с последующим расчетом температуры начала конденсации, что позволяет определить местоположение конденсата в узле конструкции и количество конденсата за период влагонакопления.

3. Существует несогласованность оценки результатов расчета количества конденсированной влаги в ограждениях по нормативной литературе. Так однородный фрагмент исследованного узла удовлетворяет требованиям СП 50.13330, но не удовлетворяет требованиям ISO 13788;

4. Показана необходимость совершенствования метода определения расчетной теплопроводности материалов ограждающих конструкций на этапе проектирования.

Список литературы / References

1. Куприянов В.Н., Юзмухаметов А. М. Разработка математической модели теплопроводности сухой и влажной минеральной ваты // Строительные материалы. 2018. № 11. С. 68. [Kupriyanov V.N., Juzmuhametov A. M. Development of mathematical model of heat conductivity of dry and wet mineral wool // Stroitel'nye materialy. 2018. № 11. P. 68.]
2. Васильев Б. Ф. Натурные исследования температурно-влажностного режима крупнопанельных жилых зданий. М.: Издат. литературы по строительству, 1968. [Vasiliev BF Field studies of the temperature and humidity regime of large-panel residential buildings. M.: Publishing house. literature on construction, 1968.]
3. Васильев Б. Ф. Натурные исследования температурно-влажностного режима жилых зданий. М.: Госстройиздат, 1957. – 214 с. [Vasiliev BF Field studies of the temperature and humidity regime of residential buildings. M.: Gosstroyizdat, 1957. - 214 p.]
4. Гагарин В. Г., Пастушков П. П., Реутова Н. А. К вопросу о назначении расчетной влажности строительных материалов по изотерме сорбции // Строительные материалы и технологии. 2015. № 4 (60). С. 152–154. [Gagarin V. G., Pastushkov P. P., Reutova N. A. On the appointment of the estimated moisture content of building materials according to the sorption isotherm // Stroitelnye materialy i tekhnologii. 2015. No. 4 (60). pp. 152–154.]
5. Korniyenko S.V., Vatin N.I., Gorshkov A.S. Thermophysical field testing of residential buildings made of autoclaved aerated concrete blocks // Magazine of Civil Engineering. No. 4. 2016. Pp. 10–25.
6. Протасевич А. М., Лешкевич В. В. Влажностный режим наружных стен в условиях Республики Беларусь // Жилищное строительство. 2013. № 9. С. 37–40. [Protasevich A. M., Leshkevich V. V. Moisture regime of external walls in the conditions of the Republic of Belarus // Housing construction. 2013. No. 9. P. 37–40.]
7. Гринфельд Г. И., Морозов С. А., Согомонян И. А., Зырянов П. С. Влажностное состояние современных конструкций из автоклавного газобетона в условиях эксплуатации // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 2 (20). С. 33–38. [G. I. Grinfeld, S. A. Morozov, I. A. Sogomonyan, and P. S. Zyryanov, Moisture state of modern structures made of autoclaved aerated concrete under operating conditions, Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal. 2011. No. 2 (20). pp. 33–38.]
8. Корниенко С. В. Совершенствование российских норм по влагозащите ограждающих конструкций // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2017. Вып. 47(66). С. 18–29. [Kornienko S. V. Improvement of Russian standards for moisture protection of building envelopes // Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture. 2017. Issue. 47(66). pp. 18–29.]
9. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Graphical method for determination of maximum wetting plane position in enclosing structures of buildings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019". 2020. С. 022046.
10. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Position control of maximum wetting plane for building walls with foam polystyrene heat insulator // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019". 2020. С. 022045.
11. Gagarin V.G., Khavanov P.A., Zubarev K.P. The position of the maximum wetting plane in building enclosing structures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering (MPCPE 2020). 2020. С. 012016.
12. Куприянов В. Н. К расчету конденсата в ограждающих конструкциях. // Сборник научных трудов РААСН: в 2 томах. Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН). Москва, 2021. С. 116–127. [Kupriyanov V.N. On the calculation of condensate in building envelopes. // Collection of scientific works of RAABS: in 2 volumes.

Russian Academy of Architecture and Building Sciences (RAABS). Moscow, 2021, pp. 116–127.]
13. Куприянов В. Н. Прогнозирование переувлажнения ограждающих конструкций при конденсации в них водяного пара // Приволжский научный журнал. 2021. № 2 (58). С. 84-91. [Kupriyanov V. N. Prediction of the overwetting of enclosing structures during water steam condensation in them // Privolzhskij nauchnyj zhurnal. 2021. № 2 (58). pp. 84-91.]
14. Перехоженцев А. Г. Проектирование многослойных ограждающих конструкций зданий с заданным тепло-влажностным режимом // В сборнике: Качество внутреннего воздуха и окружающей среды. Indoor air quality and environment. Материалы XIX Международной научной конференции. Волгоград. 2021. С. 44–52. [Perekhozhentsev A. G. Design of multilayer building envelopes with a given heat and humidity regime // In the collection: Quality of internal air and the environment. indoor air quality and environment. Proceedings of the XIX International Scientific Conference. Volgograd. 2021, pp. 44–52.]
15. Куприянов В.Н. К расчету конденсата в ограждающих конструкциях // В сборнике: Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020 году. Сборник научных трудов РААСН: в 2 томах. Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН). Москва, 2021. С. 116-127. [Kupriyanov V.N. To the calculation of condensate in the enclosing structures // In the collection: Fundamental, exploratory and applied research of the RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2020. Collection of scientific works of RAASN: in 2 volumes. Russian Academy of Architecture and Building Sciences (RAABS). Moscow, 2021. pp. 116-127.]

Информация об авторах

Артем Сергеевич Петров, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: ruarty@mail.ru
Алексей Игоревич Иванцов, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: ivantsov.arch@mail.ru
Айнур Мансурович Юзмухаметов, ассистент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: aynur.yuzmuhametov@mail.ru

Information about the author

Artem S. Petrov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russian Federation
Email: ruarty@mail.ru
Aleksey I. Ivantsov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russian Federation
Email: ivantsov.arch@mail.ru
Ainur M. Yuzmukhametov, Assistant, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russian Federation
Email: aynur.yuzmuhametov@mail.ru

УДК: 624.012
DOI: 10.52409/20731523_2022_3_56
EDN: FDMELF

Исследование напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных балок с частичной заделкой двутавровых сечений в бетоне

Ильшат Т. Мирсаяпов[1], И.М. Гиматдинов[1]
[1]Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Существует множество способов расчета железобетонных и стальных конструкций, но в настоящее время отсутствуют полные нормативные документы для проектирования сталежелезобетонных конструкций для случая, когда стальная двутавровая балка заделана в тело бетона. В связи с этим вопрос изучения работы сталежелезобетонных конструкций весьма актуален в настоящее время. Из-за отсутствия полной нормативной базы по расчету сталежелезобетонных балок с частичным обетонированием двутавровых сечений в бетоне появляется необходимость в модели расчета конструкций численными методами. Целью работы является разработка методики и модели определения разрушения бетона через диаграмму деформирования, с помощью программного комплекса ANSYS. Задачи работы: провести анализ исследований и экспериментов сталежелезобетонных балок с частичной заделкой двутавровых сечений в бетоне и на основе эксперимента предложить способ определения разрушения бетона через диаграмму деформирования в программном комплексе ANSYS.
Результаты. Представлена модель в программном комплексе ANSYS, описывающая работу сталежелезобетонной балки с частичной заделкой двутаврового сечения в бетоне, позволяющая оценить напряженно-деформированное состояние всего сечения.
Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в том, что предложенная модель в программном комплексе ANSYS позволяет оценить напряженно–деформированное состояние конструкции. Это является существенным вкладом в развитие методики и совершенствование нормативной базы расчетов при проектировании сталежелезобетонных конструкций.

Ключевые слова: сталежелезобетон, сталежелезобетонная балка, ANSYS, численные методы.

Для цитирования: Ильшат Т.Мирсаяпов, И.М.Гиматдинов Исследование напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных балок с частичной заделкой двутавровых сечений в бетоне // Известия КГАСУ 2022 №3(61) с.56-66, DOI:10.52409/20731523_2022_3_56, EDN: FDMELF

Study of the stress-strain state of steel-reinforced concrete beams with partial embedding of I-sections in concrete

Ilshat T. Mirsayapov [1], I. M. Gimatdinov [1]
[1]Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract. *Statement of the problem.* There are many ways to calculate reinforced concrete and steel structures, but at present there are no complete regulatory documents for the design of steel-reinforced concrete structures, for the case when a steel I-beam is embedded in a concrete body. In this regard, the issue of studying the work of steel-reinforced concrete structures is

very relevant at the present time. Due to the lack of a complete regulatory framework for the calculation of steel-reinforced concrete beams with partial concreting of I-sections in concrete, there is a need for a model for calculating structures by numerical methods. The aim of the work is to develop a methodology and model for determining the destruction of concrete through the deformation diagram, using the ANSYS software package. Objectives of the work: to analyze the research and experiments of steel-reinforced concrete beams with partial sealing of I-sections in concrete and, based on the experiment, to propose a method for determining the destruction of concrete through a deformation diagram in the ANSYS software package.
Results. A model is presented in the ANSYS software that describes the operation of a steel-reinforced concrete beam with a partial embedment of an I-section in concrete, which makes it possible to evaluate the stress-strain state of the entire section.
Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry lies in the fact that the proposed model in the ANSYS software allows us to evaluate the stress-strain state of the structure. This is a significant contribution to the development of the methodology and improvement of the regulatory framework for calculations in the design of steel-reinforced concrete structures.

Keywords: steel-reinforced concrete, steel-reinforced concrete beam, ANSYS, numerical methods.

For citation: Ilshat T. Mirsayapov, I.M. Gimatdinov Study of the stress-strain state of steel-reinforced concrete beams with partial embedding of I-sections in concrete // News KSUAE, 2022 №3(61), p. 56-66, DOI:10.52409/20731523_2022_3_56, EDN: FDMELF

1. Введение

Изучению сталежелезобетонных конструкций уделяют особое внимание во всем мире, поскольку они имеют ряд преимуществ: благодаря объединению двух совершенно разных материалов обладают свойствами и стали, и железобетона, что позволяет им оптимально работать и в растянутой, и в сжатой зонах [1,2].Также стоит отметить, что одними из преимуществ сталежелезобетонных конструкций является повышение жесткости и прочности конструкций. В связи с этим становится возможным уменьшение размеров сечения несущих элементов, что приводит к экономии строительных материалов, и как следствие, снижению трудоемкости[1-4].

Для конструкций из сталежелезобетона характерны простота сборки, ремонта и усиления конструкции, а также более высокая пожароустойчивость вследствие защиты стали от местного температурного воздействия железобетоном. Увеличение устойчивости конструкции за счет применения сталежелезобетона позволяет использовать этот материал в сейсмически опасных районах [2-3].

За рубежом сталежелезобетонные конструкции применяются при строительстве промышленных и гражданских зданий, небоскребов. Но в России область применения сталежелезобетонных конструкций весьма ограничена. Их используют при строительстве мостов, трубопроводов, гидроэлектростанций. Одной из причин, препятствующих широкому применению данных конструкций, является отсутствие нормативной базы, учитывающей все узловые соединения таких конструкций [1].

С 1 июля 2017 года действует СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования». Но в указанном своде правил железобетонная плита учитывается лишь как пригруз, для включения плиты в совместную работу используют анкера, что увеличивает материалоемкость стали. В СП 266.1325800.2016 представлены следующие варианты сечений комбинированных балок:

1) стальная балка и плита объединены с помощью упоров;
2) стальная балка частично обетонирована и объединена с плитой с помощью упоров;
3) стальная балка и плита с вутами объединены с помощью упоров;
4) стальная балка частично обетонирована, сборные железобетонные плиты опираются на нижний пояс балки через лист;
5) опирание плиты по профилированному настилу на стальную балку (промежуточная опора настила);

6) опирание плиты по профилированному настилу на частично обетонированную стальную балку (крайняя опора настила);
7) полное обетонирование стальной балки;
8) опирание железобетонной плиты на нижний пояс балки, упоры на полке балки;
9) опирание железобетонной плиты на нижний пояс балки, упоры на стенке балки

Стоит отметить, что в представленных вариантах сталежелезобетонных конструкций стальной элемент либо полностью заделан в тело бетона, либо является отдельным элементом конструкции, которая включается в работу с помощью анкеров. Также необходимо обратить внимание, что не рассматривается сечение, где балка была бы частично заделана в тело бетона. В связи с этим вопрос изучения работы сталежелезобетонных конструкций (когда двутавровая балка частично заделана в тело бетона) весьма актуален в настоящее время.

По сечениям комбинированных балок, которые приводятся в своде правил СП 266.1325800.2016, проводилось много исследований как в России, так и за рубежом. На основании этих экспериментов были представлены модели расчета балок в ПК (программного комплекса) ANSYS [5-9].

Цель работы заключается в разработке методики и модели определения разрушения бетона через диаграмму деформирования, с помощью ПК ANSYS. Задачи исследования:

1. провести анализ исследований и экспериментов сталежелезобетонных балок с частичной заделкой двутавровых сечений в бетоне
2. на основе эксперимента предложить способ определения разрушения бетона через диаграмму деформирования в программном комплексе ANSYS.

2. Материалы и методы

M.Rabie, W.Zaki и S.Zaky [10] рассматривали усиление стальной двутавровой балки. В данной статье была рассмотрена несущая способность 15 образцов (разные по вылету балки, высоте балки, высоте заделки двутавра в тело бетона, а также отдельно двутавр). Все геометрические характеристики, а также сечения образцов представлены в таблице 1 [10].

Таблица 1

Геометрические характеристики образцов [10]

Образец №1	Сталь 1 - балка без бетонной плиты			
Группа №1 (5 экспериментов)	№ эксперимента	Ts (sm)	B (sm)	A
	GB1.1	8	30	(1/3) Ts
	GB1.2	8	30	(2/3) Ts
	GB1.3	8	30	(1/2) Ts
	GB1.4	8	50	(1/2) Ts
	GB1.5	8	30	плита оперта
Группа №2 (5 экспериментов)	GB2.1	10	30	(1/3) Ts
	GB2.2	10	30	(2/3) Ts
	GB2.3	10	30	(1/2) Ts
	GB2.4	10	50	(1/2) Ts
	GB2.5	10	30	плита оперта
Группа №3 (4 эксперимента)	GB3.1	12	30	(2/3) Ts
	GB3.2	12	30	(1/2) Ts
	GB3.3	12	50	(1/2) Ts
	GB3.4	12	30	плита оперта

Образцы испытывали под действием сосредоточенной нагрузки. Все балки опирались на две краевые опоры, чтобы представить случай свободно опертых балок, а

нагрузки прикладывались гидравлическим домкратом, нагрузка увеличивалась на шаг, равный 0,5 т. [10].

На основании проведенных испытаний получены следующие величины разрушающих нагрузок (таблица 2) [10].

Таблица 2

Результаты проведенного испытания[10]

Образец	Разрушающая нагрузка (тонн)
GB1.1	6,3
GB1.2	7,4
GB1.3	7
GB1.4	7,7
GB1.5	8
GB2.1	6,7
GB2.2	8
GB2.3	7,3
GB2.4	8,5
GB2.5	8,9
GB3.1	8,3
GB3.2	8
GB3.3	10,5
GB3.4	10,2

В связи с вышеизложенным, смоделируем образец GB2.3 в ПК ANSYS и сравним полученные результаты эксперимента и численного моделирования.

Все исходные данные (материалы, геометрические характеристики) принимаются исходя из применяемых материалов в эксперименте.

Для расчета в ПК ANSYS заданы следующие материалы:

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	2300	kg m^-3
4	⊞ Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	⊟ Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
8	Young's Modulus	38000	MPa
9	Poisson's Ratio	0,18	
10	Bulk Modulus	1,9792E+10	Pa
11	Shear Modulus	1,6102E+10	Pa
12	⊞ Multilinear Isotropic Hardening	Tabular	
15	Tensile Yield Strength	0	Pa
16	Compressive Yield Strength	0	Pa
17	Tensile Ultimate Strength	1,15	MPa
18	Compressive Ultimate Strength	17	MPa

а)

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7850	kg m^-3
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
8	Young's Modulus	2E+11	Pa
9	Poisson's Ratio	0,3	
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
12	Strain-Life Parameters		
20	S-N Curve	Tabular	
24	Tensile Yield Strength	435	MPa
25	Compressive Yield Strength	435	MPa
26	Tensile Ultimate Strength	500	MPa
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa

б)

1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7850	kg m^-3
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
6	Young's Modulus	2,06E+05	MPa
7	Poisson's Ratio	0,3	
8	Bulk Modulus	1,7167E+11	Pa
9	Shear Modulus	7,9231E+10	Pa
10	Bilinear Isotropic Hardening		
11	Yield Strength	345	MPa
12	Tangent Modulus	615	MPa

в)

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7850	kg m^-3
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
8	Young's Modulus	2,08E+05	MPa
9	Poisson's Ratio	0,3	
10	Bulk Modulus	1,7333E+11	Pa
11	Shear Modulus	8E+10	Pa
12	Strain-Life Parameters		
20	S-N Curve	Tabular	
24	Tensile Yield Strength	295	MPa
25	Compressive Yield Strength	295	MPa
26	Tensile Ultimate Strength	415	MPa
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa

г)

Рис. 1. а) характеристики бетона В30, б) характеристики арматуры А500, в) характеристики стали С345 (по билинейной диаграмме) для двутавра, г) характеристики стали С345-15ХСНД для пластины и опор (принято условно)

Fig. 1. a) characteristics of concrete B30, b) characteristics of reinforcement A500, c) characteristics of steel C345 (according to a bilinear diagram) for an I-beam, d) characteristics of steel C345-15XCHD for a plate and supports (accepted conditionally)

На рисунке 2 представлена собранная геометрия модели. Снизу двутавра на двух концах созданы цилиндрические формы, с помощью которых моделируются опоры (связь между двутавром и опорой задается – Noseparation, данная связь подразумевает недопущение разделения контактных поверхностей, однако допускает небольшое относительное скольжение между ними с нулевым трением). На верхней части моделируется пластина, которая подразумевает опорную часть гидравлического домкрата. С помощью этой пластины передается нагрузка на конструкцию (контакт между пластиной и домкратом задается с помощью коэффициента силы трения 0,01).

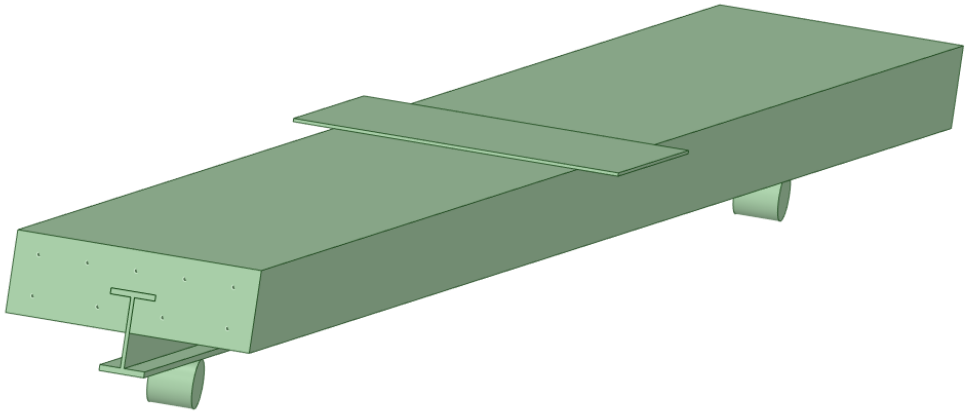


Рис. 2. Модель GB2.3 в ПК ANSYS
Fig. 2. Model GB2.3 in ANSYS PC

Пренебрежем тем, что арматура должна быть полностью защищена защитным слоем, на точности расчета это не сказывается. Контакт между бетоном и двутавром зададим как Bonded, т.е. тела накрепко сцеплены друг с другом.

Цилиндрические опоры закрепим во всех направлениях (Fixedsupport), силу будем прикладывать на пластину (Force), также необходимо учитывать силу гравитации (StandardEarthGravity).

Арматуру будем учитывать с помощью использования элементов reinf264. Бетон при задании диаграммы деформирования в ПК ANSYS будет учитываться только как сжатый элемент.

Методика расчета заключается в том, чтобы на основании диаграммы деформирования бетона определить при какой силе разрушится бетон. На рисунке 3 представлена диаграмма деформирования бетона В30 в сжатой зоне.



Рис. 3. Диаграмма деформирования бетона В30
Fig. 3. Diagram of deformation of concrete B30

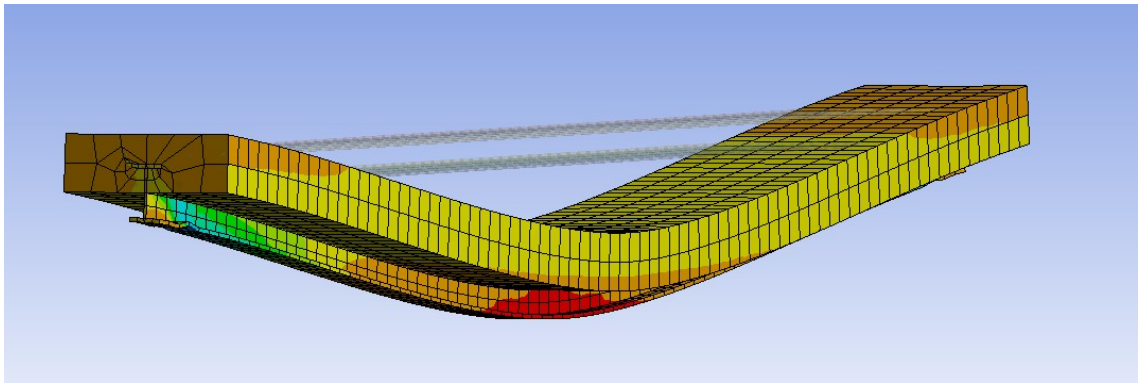
На основании данной диаграммы можно сделать вывод о том, что при достижении относительных деформаций больше 0,0035 бетон разрушается. На основании данной диаграммы необходимо определить, при какой нагрузке бетон разрушится.

3. Результаты и обсуждение

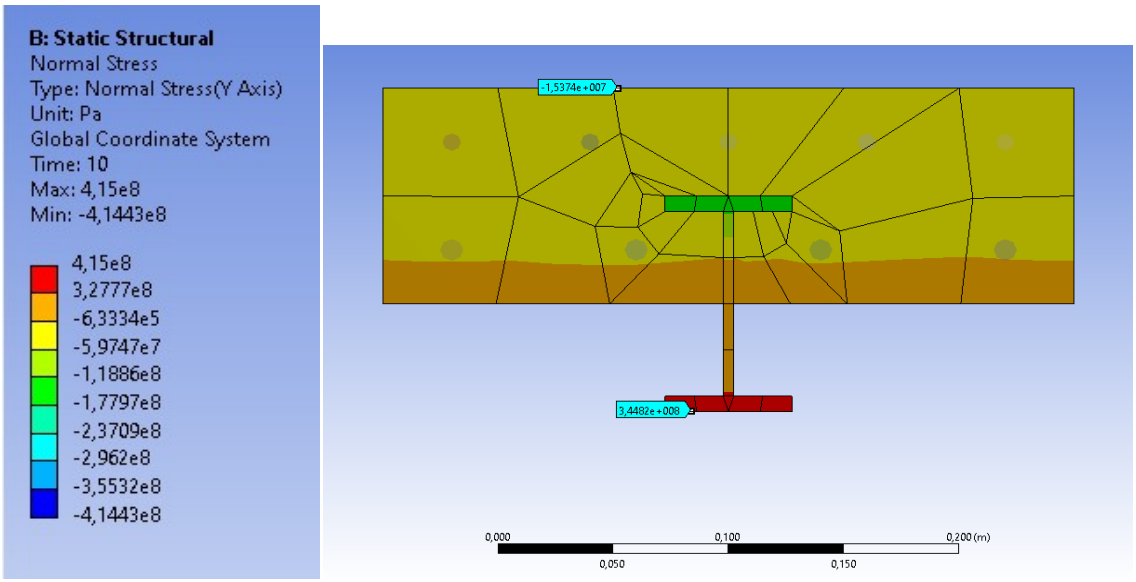
Для анализа полученных результатов необходимо определить относительные деформации (EquivalentTotalStrain), а также нормальные напряжения (NormalStress). Для получения корректных результатов необходимо создать сечение в центре балки (SectionPlane). Помимо основной системы координат (GlobalCoordinateSystem) понадобятся и местные системы координат (CoordinateSystem).

Задаем пошаговую нагрузку до 80000 Н.

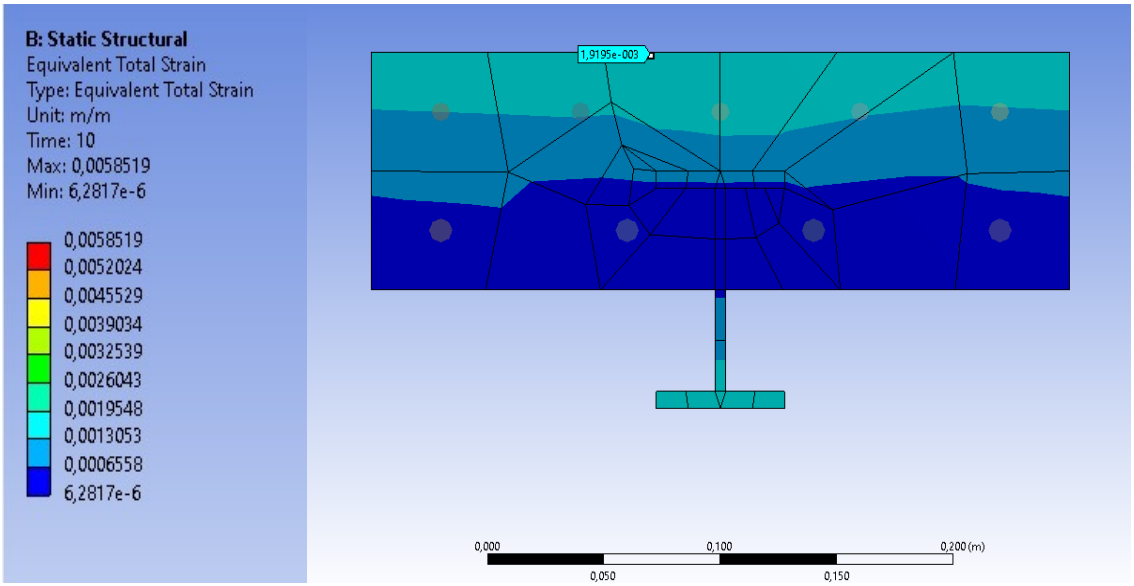
Для более удобного отображения результатов скроем пластину и опоры. На рисунке 4.а. представлена общая картина прогибов (масштаб прогибов выбран пятикратным для лучшей восприимчивости), а также показано распределение нормальных напряжений по всей длине балки.



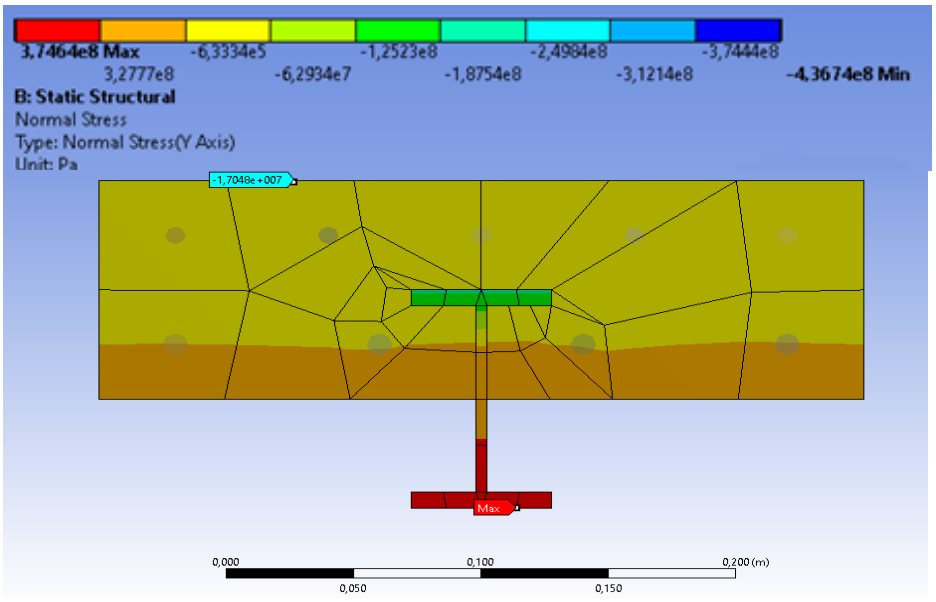
а)


B: Static Structural
Normal Stress
Type: Normal Stress(Y Axis)
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 10
Max: 4,15e8
Min: -4,1443e8
4,15e8
3,2777e8
-6,3334e5
-5,9747e7
-1,1886e8
-1,7797e8
-2,3709e8
-2,962e8
-3,5532e8
-4,1443e8
-1,5374e+007
3,4482e+008
0,000
0,100
0,200 (m)
0,050
0,150

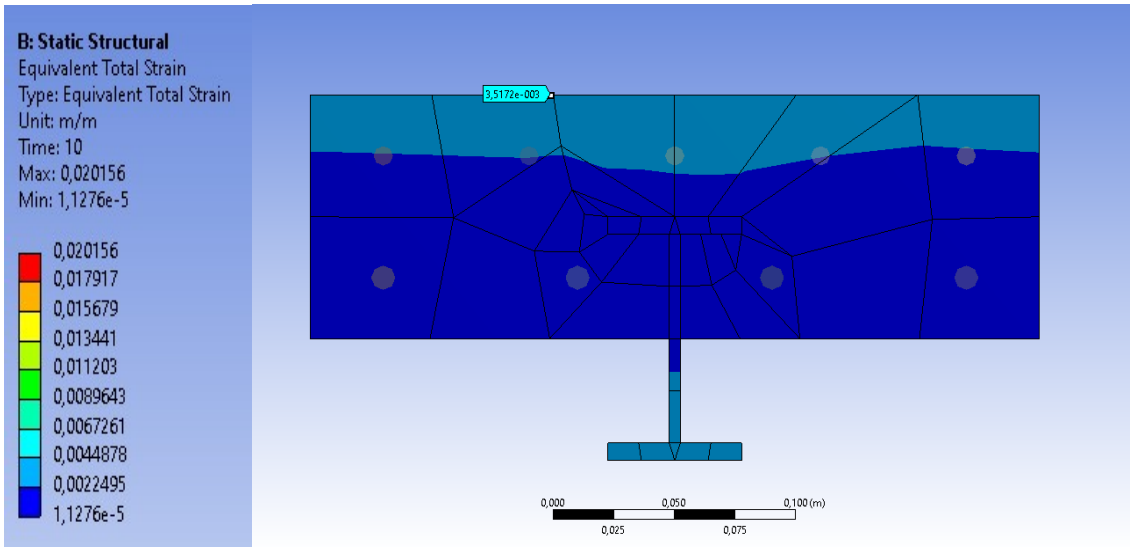
б)


B: Static Structural
Equivalent Total Strain
Type: Equivalent Total Strain
Unit: m/m
Time: 10
Max: 0,0058519
Min: 6,2817e-6
0,0058519
0,0052024
0,0045529
0,0039034
0,0032539
0,0026043
0,0019548
0,0013053
0,0006558
6,2817e-6
1,9195e-003
0,000
0,100
0,200 (m)
0,050
0,150

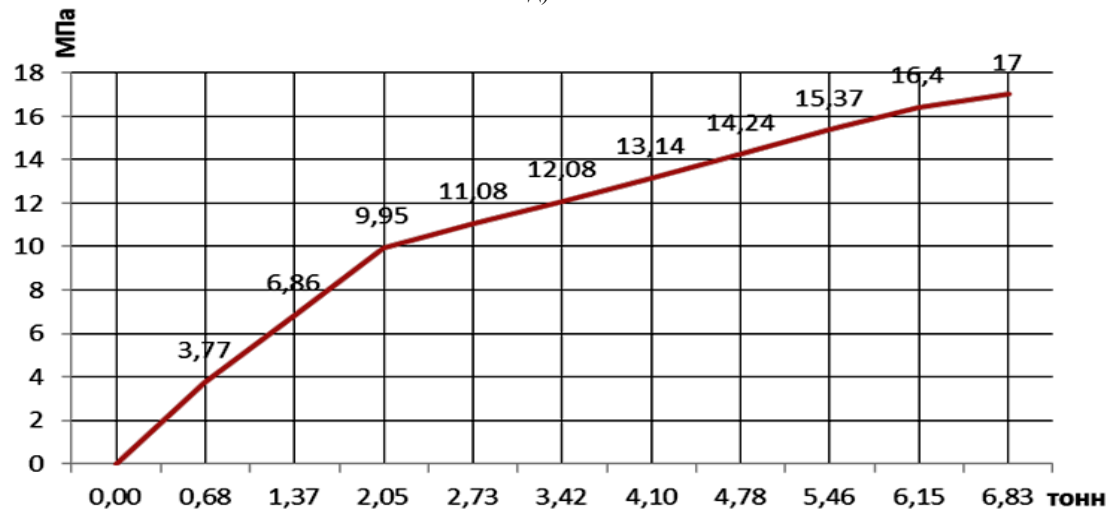
в)


3,7464e8 Max
-6,3334e5
-1,2523e8
-2,4984e8
-3,7444e8
3,2777e8
-6,2934e7
-1,8754e8
-3,1214e8
-4,3674e8 Min
B: Static Structural
Normal Stress
Type: Normal Stress(Y Axis)
Unit: Pa
-1,7048e+007
Max
0,000
0,100
0,200 (m)
0,050
0,150

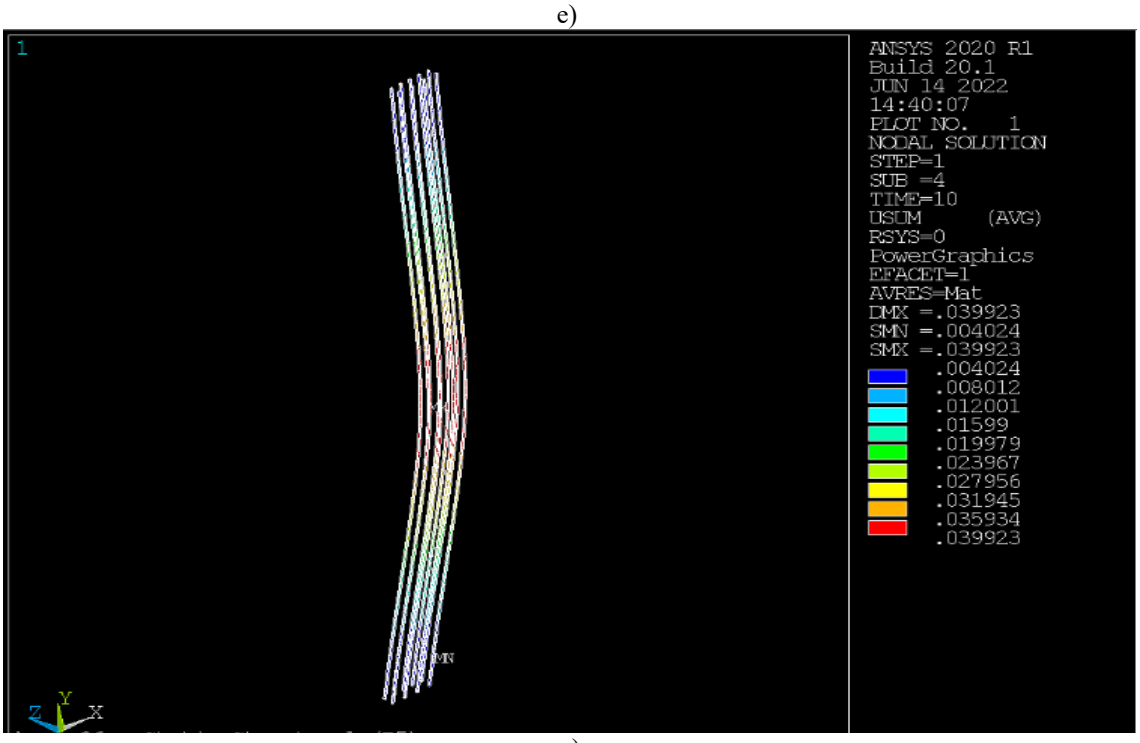
г)


B: Static Structural
Equivalent Total Strain
Type: Equivalent Total Strain
Unit: m/m
Time: 10
Max: 0,020156
Min: 1,1276e-5
0,020156
0,017917
0,015679
0,013441
0,011203
0,0089643
0,0067261
0,0044878
0,0022495
1,1276e-5
3,5172e-003
0,000
0,050
0,100 (m)
0,025
0,075

д)


МПа
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
3,77
6,86
9,95
11,08
12,08
13,14
14,24
15,37
16,4
17
0,00
0,68
1,37
2,05
2,73
3,42
4,10
4,78
5,46
6,15
6,83
тонн

е)


1
ANSYS 2020 R1
Build 20.1
JUN 14 2022
14:40:07
PLOT NO. 1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =4
TIME=10
USUM (AVG)
RSYS=0
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
DMX =.039923
SMN =.004024
SMX =.039923
.004024
.008012
.012001
.01599
.019979
.023967
.027956
.031945
.035934
.039923
MN
Y
Z
X

ж)

Рис. 4. а) нормальные напряжения в исследуемой балке, б)нормальные напряжения в сечении балки при P=5,47 т., в) относительные деформации в сечении балки при P=5,47 т., г) нормальные напряжения в сечении балки при P=6,83 т., д) относительные деформации в сечении балки при P=6,83 т., е) график изменения нормальных напряжений, ж) перемещения арматуры в теле балки при P=6,83 т.

Fig. 4. a) normal stresses in the beam under study, b)normal stresses in the beam section at P=5.47 t., c)relative deformations in the beam section at P=5.47 t., d) normal stresses in the beam section at P=6.83 t., e)relative deformations in the beam section at P=6.83 t., f) graphofnormalstresses, g) reinforcement displacements in the beam body at P=6.83 t..

Из полученных результатов видно, что при нагрузке 6,83 т происходит разрушение бетона, поскольку при этой нагрузке бетон достигает максимально допустимые напряжения. Стоит отметить, что максимальные напряжения смещены из-за сцепления пластины домкрата и бетона с помощью коэффициента трения. Резкий скачок нормальных напряжений при стыке материалов бетона на двутавр обусловлен тем, что они имеют разный модуль упругости, а также отсутствием (незначительным) сцепления между бетоном и верхним поясом стальной балки.

Стоит отметить, что при разрушающей нагрузке у стального двутавра нижняя часть сечения полностью нагружена. Но разрушение происходит по бетону, т.к. сталь является более пластичным материалом, из-за своей площадки текучести.

Если рассматривать напряжения при нагрузке 80% от разрушающей нагрузки, можно отметить, что нижняя часть двутавра используется полностью, а относительные деформации в бетоне при той же самой нагрузке уже близки к пределу пропорциональности диаграммы работы бетона.

Разница в полученных результатах составляет 6,4% (между экспериментом (7,3т) и численным моделированием (6,83т.), что является приемлемым результатом.

4. Заключение

1. На основе проведенного эксперимента представлена модель расчета в ПК Ansys, которая позволяет моделировать и прогнозировать разрушение сталежелезобетонных балок с частичной заделкой двутавровых сечений в бетоне.
2. Представлен способ определения разрушения бетона через диаграмму деформирования.

Список литературы/References

1. Кибириева Ю.А., Астафьева Н.С. Применение конструкций из сталежелезобетона. EkologiyaandStroitelstvo . 2018. Номер 2, С. 27-34. DOI: 10.24411/2413-8452-2018-10004.[Kibirieva Yu.A., Astafieva N.S. The use of steel-reinforced concrete structures. Ecology and construction. 2018. Number 2, pp. 27-34. DOI: 10.24411/2413-8452-2018-10004.]
2. Теплова Ж.С, Виноградова Н.А. Прочность сталежелезобетонных образцов при центральном сжатии. Строительствоуникальныхзданийисооружений. 2015. Номер5 (32),С.29-38. [Teplova Zh.S., Vinogradova N.A. Strength of steel-reinforced concrete specimens under central compression. Construction of buildings and structures. 2015. Number 5 (32), pp. 29-38.]
3. Бабалич В.С., Андросов Е.Н. Сталежелезобетонные конструкции и переспектива их применения в строительной практике России. Успехисовременнойнауки. 2017. Номер 4, С. 205-208. [Babalich V.S., Androsov E.N. Steel-reinforced concrete structures and the prospect of their application in the construction practice of Russia. Successes of modern science. 2017. Number 4, pp. 205-208.]
4. Настоящий В.А., Дариенко В.В. История возникновения и практика применения сталежелезобетонных конструкций для объектов дорожного и гражданского строительства. Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2014. Номер 1, С.467-470. [Real V.A., Darienko V.V. The history of the emergence and use of steel-reinforced concrete structures for the construction of road and nearby construction. Modernization and scientific research in the transport complex. 2014. Number 1, pp. 467-470.]

5. YuanlongYang, WentaoLiang. QingjieYang, Yu Cheng. Flexural behavior of web embedded steel-concrete composite beam. Engineering Structures. 2021. Volume 240.
6. Yinghui Li, Huanjun Jiang, T.Y.Yang. Damage Deformation of Flexure-Yielding Steel-Reinforced Concrete Coupling Beams: Experimental and Numerical Investigation, Advances in Civil Engineering, 2019.
7. Du, Y.; Zhang, X.; Liu, L.; Zhou, F.; Zhu, D.; Pan, W. Flexural Behaviour of Carbon Textile-Reinforced Concrete with Prestress and Steel Fibres. Polymers 2018, 10, 98. https://doi.org/10.3390/polym10010098
8. Замалиев Ф.С. Численные и натурные эксперименты преднапряженных сталежелезобетонных балок. ВестникМГСУ. 2018. Вып. 3(11). С.309-321. [Zamaliev F.S. Numerical and natural experiments of prestressed steel-reinforced concrete beams. Bulletin of MGSU. 2018. Issue. 3(11). pp.309-321.]
9. Isaac Montava, Ramon Irles, Jorge Segura, Jose Maria Gadea and Ernesto Juliá. Numerical Simulation of Steel Reinforced Concrete (SRC) Joints, 2019.
10. M.Rabie, W.Zaki and S.Zaky. STRENGTHENING STEEL I-BEAM WITH CONCRETE FLANGE. Strengthening steel I-beam with concrete flange. Proc. of Fifth International Conference On Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering -ACSM 2016, 4-8 DOI: 10.15224/978-1-63248-105-4-21.
11. C. J. Motter, D. C. Fields, J. D. Hooper et al., “Steel-reinforced concrete coupling beams. I: testing,” Journal of Structural Engineering, vol. 143, no. 3, article 04016191, 2016. DOI:10.1155/2019/7071243
12. Замалиев Ф.С., Тамразян А.Г. К расчету сталежелезобетонных ребристых плит для восстанавливаемых перекрытий. Строительство и реконструкция. 2021;(5):3-15. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-97-5-3-15
13. Dmitriev, A., Novozhilov, Yu., Mikhalyuk, D., Lalin, V., Calibration and Validation of the Menetrey-Willam Constitutive Model for Concrete; 2020; Construction of Unique Buildings and Structures; Volume 88 Article No 8804. DOI:10.18720/CUBS.88.4
14. Pisano, A.A., Fuschi, P., De Domenico, D. Limit state evaluation of steel-reinforced concrete elements by von mises and Meńetrey-Willam-type yield criteria. International Journal of Applied Mechanics. 2014. 6(5). Pp. 1450058. DOI:10.1142/S1758825114500586
15. Pisano, A.A., Fuschi, P., De Domenico, D. Peak loads and failure modes of steel-reinforced concrete beams: Predictions by limit analysis. Engineering Structures. 2013. 56. Pp. 477–488. DOI:10.1016/j.engstruct.2013.05.030.

Информация об авторах

Ильшат Талгатович Мирсаяпов, доктор технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
E-mail: mirsayapovit@mail.ru
Ильнур Мансурович Гиматдинов, магистр КГАСУ по направлению Проектирование железобетонных и каменных конструкций, реконструкция и техническая эксплуатация зданий и сооружений, г. Казань, Российская Федерация
E-mail: akkfok@mail.ru

Information about the authors

Ilshat Talgatovich Mirsayapov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russian Federation
E-mail: mirsayapovit@mail.ru
Ilnur Mansurovich Gimatdinov, master of KSUAE in the direction of Design of reinforced concrete and stone structures, reconstruction and technical operation of buildings and structures, Kazan, Russian Federation
E-mail: akkfok@mail.ru

УДК: 691.33
DOI: 10.52409/20731523_2022_3_67
EDN: HOAOTX

Топливно-энергетический комплекс, экология и минеральные вяжущие вещества

Р.З. Рахимов[1],
[1]Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: В статье представлен обзор современного состояния актуальной проблемы снижения материалоемкости промышленности строительных материалов путем вовлечения в их производство крупнотоннажных промышленных отходов, к которым относятся и разнообразные отходы топливно-энергетического комплекса. Проанализированы виды образующихся и приведены объемы накопленных к настоящему времени различными отраслями топливно-энергетического комплекса отходов. Приведен обзор современных достижений в области эффективного обращения с отходами при производстве минеральных вяжущих, материалов и изделий на их основе. Показан недостаточный уровень реализации перспективных вариантов использования отходов в промышленности строительных материалов и снижения нагрузки топливно-энергетического комплекса на окружающую среду. Сформулированы основные направления решения проблем экологической безопасности, ресурсо- и энергосбережения в производстве цементов и бетонов.

Ключевые слова: отходы, цемент, зола, шлак

Для цитирования: Рахимов Р.З. Топливно-энергетический комплекс, экология и минеральные вяжущие вещества // Известия КГАСУ 2022 №3(61), с.67-74 DOI: 10.52409/20731523_2022_3_67, EDN: HOAOTX

Fuel and energy complex, ecology and mineral binders

R.Z. Rakhimov[1]
[1]Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract: The article presents an overview of the current state of the current problem of reducing the material consumption of the building materials industry by involving large-tonnage industrial wastes in their production, which includes various wastes of the fuel and energy complex. The types of waste generated and the volumes of waste accumulated by various branches of the fuel and energy complex have been analyzed. A review of modern achievements in the field of efficient waste management in the production of mineral binders, materials and products based on them is presented. The insufficient level of implementation of promising options for using waste in the building materials industry and reducing the burden of the fuel and energy complex on the environment is shown. The main directions for solving the problems of environmental safety, resource and energy saving in the production of cements and concretes are formulated.

Keywords: wastes, cement, fly ash, slag

For citation: Rakhimov R.Z. Fuel and energy complex, ecology and mineral binders // News KSUAE 2022 №3 (61), p. 67-74 DOI: 10.52409/20731523_2022_3_67, EDN: HOAOTX

1. Введение

Топливно-энергетический комплекс (ТЭК) является драйвером развития экономики, промышленности, всех отраслей народного хозяйства в целом, наилучших доступных технологий, предпринимательства, производительности труда, человеческого потенциала, здравоохранения, культуры, науки, образования, экологической безопасности окружающей среды. Комплекс обеспечивает более четверти валового внутреннего продукта России, на него приходится около 30% основных фондов [1]. Вместе с тем, деятельность комплекса сопровождается образованием отходов, загрязняющих атмосферу, гидросферу и литосферу окружающей среды. Ежегодно в мире сжигается около 1 млрд.т. условного топлива с образованием при этом до 400 млн.т. золы, пепла, сажи и шлака. Отдельные разновидности многотоннажных отходов являются ценным сырьевым ресурсом для производства минеральных вяжущих веществ и широкой номенклатуры строительных материалов на их основе.

Проблема утилизации промышленных отходов объединила в себе вопросы охраны окружающей среды от загрязнения и вопросы ресурсосбережения. Отходы с одной стороны являются тяжким бременем для существования жизни на земле, а с другой стороны они являются огромным богатством, если ими распорядиться по-хозяйски. По прогнозу экспертов ООН во главе с В.Леонтьевым уже в первой половине 21-го века до 55% потребностей в природном сырье будет восполняться промышленными отходами [2].

Известно, что использование 1% отходов позволяет экономить 2% инвестиций в сырьевой комплекс.

Производственной практикой с древних времен и научными исследованиями с 18-го века установлено, что отходы производства и потребления в основной массе являются ценным вторичным сырьевым ресурсом, утилизация которого в промышленности позволяет поддерживать дальнейший рост развития экономики, сокращать использование природного сырья, добыча которого во все возрастающих объемах наносит невосполнимый ущерб окружающей среде и природе [3].

Цели настоящего обзора:

- анализ видов отходов топливно-энергетического комплекса, пригодных для производства строительных материалов,
- обзор современных достижений по разработке и производству строительных материалов на основе отходов топливно-энергетического комплекса,
- определение перспективных возможностей решения проблем ресурсо- и энергосбережения в промышленности строительных материалов.

2. Основная часть

2.1. Топливно-энергетический комплекс, сырьевые ресурсы и продукция

Топливно-энергетический комплекс включает совокупность производств по добыче топливно-энергетических ресурсов, их транспортировку, преобразование и потребление как первичных, так и преобразованных видов энергоносителей. В комплекс входят предприятия [1]:

– топливной промышленности – угольной, газовой, нефтяной, торфяной, сланцевой;

– электроэнергетики – электростанции тепловые, гидроэлектростанции, атомные и альтернативной энергетики (солнечной, ветровой, приливной и др.);

– транспорта и распределения энергоносителей, тепловой и электрической энергии.

В России электроэнергия вырабатывается с использованием энергоресурсов, в %: угля – 13, атомного – 20, гидро – 20, газа и нефти – 45, солнечной – 0,7; ветровых и гидротермальных – около 0,8.

В 20-х годах текущего столетия предприятия ТЭК России ежегодно вырабатывали около 1100 терраватт·ч электроэнергии и около 1300 млн.Гкал. тепловой энергии, занимая четвертое месть в мире.

Россия располагает четвертью мировых потенциальных ресурсов каменного угля, достаточных на 420 лет потребления [4]. Ежегодная добыча угля в последние годы составляла 400 – 450 млн.т., из которых 73% - открытым способом. Половина добываемого угля подвергается гравитационному или флотационному обогащению.

На предприятиях ТЭК России ежегодно используется около 130 млн.т твердых топливных ресурсов – преимущественно каменного угля. Угольная генерация обеспечивает получение 20% тепловой и 13 – 17% электрической энергии, 45% тепловой и электрической энергии генерируется за счет использования газа и нефти.

Россия занимает 1-ое место в мире по разведанным запасам природного газа, ежегодная добыча которого составляет около 750 млрд.м^3 [5]. Второе место в мире Россия занимает по запасам разведанных нефтяных месторождений. В 2020-ом году было добыто 524,4 млн.т. нефти, что составляло 12,6% ее мировой добычи. Половина объема добываемой нефти направлялась на экспорт. Также 2-ое место Россия занимает и по запасам торфа с объемом разведанных ресурсов в 150 млрд.т. [1]. Ежегодное потребление его составляет около 5 млн.т.

В России запасы горючих сланцев оцениваются в объеме 1,9 трлн.т. Основной объем их ежегодной добычи в 2,5 млн.т. направляется на экспорт.

2.2. Экология и отходы топливно-энергетического комплекса

Человеческая деятельность, тысячелетиями направленная на непрерывное увеличение производства различной продукции и изъятие природных ресурсов, сопровождалась загрязнением окружающей среды техногенными продуктами, приведшим к мировым экологическим проблемам, среди которых [3]:

– глобальное потепление климата, сопровождающееся увеличением числа разрушительных природных катаклизмов;

– увеличение смогов над крупными городами, в которых проживает до 50% населения мира;

– ослабление озонового слоя и увеличение притока ультрафиолетовых лучей на поверхности земли;

– ежегодный слив в водный бассейн промышленных и бытовых стоков приводит к загрязнению около 70% рек и 20% поверхности мирового океана;

– ежегодное изъятие из недр земли более 4,2 млрд.т. горных пород с образованием 97 – 99% отходов их добычи и переработки;

– ежегодное образование отходов промышленности и потребления в объеме более 5 млрд. тонн;

– ежегодный выброс в атмосферу около 150 млн.тонн отходов твердых веществ;

– годовой ущерб от загрязнения окружающей среды отходами производства и потребления составляет 10% мирового ВВП;

– рост числа эпидемических заболеваний населения.

Дальнейшее накопление объемов отходов промышленности и потребления на свалках, отвалах и хранилищах, в водном бассейне и атмосфере может иметь губительные последствия как для отдельных стран, так и в целом для земного шара. Эта проблема во второй половине прошлого столетия привела к пересмотру стратегии развития земной цивилизации, в основу которой заложены принципы ресурсосбережения и охраны окружающей среды и которые стали закладываться в основу национальных программ многих стран. С 2019 г. и в России реализуется национальный проект «Экология». Одним из основных источников загрязнения окружающей среды является в России топливно-энергетический комплекс.

Наиболее негативное влияние на окружающую среду из отраслей ТЭК оказывают отходы угольной промышленности России. В процессе добычи угля открытым и шахтным способом образуется ежегодно около 1,33 млрд.т. вскрышных пород. Половина добываемого угля подвергается гравитационному или флотационному обогащению. «Запасы» продуктов гравитационного обогащения, состоящих преимущественно из пустых пород, к настоящему времени составляют около 100 млн.т...

В целом в отвалах и шламохранилищах добычи угля накопилось более 12 млрд. т. отходов, которые состоят из глинистых пород, пыли, песка, гравия, горелых пород, каменных минеральных горных пород. В сфере добычи и транспортировки нефти и газа при расчистке трасс нефте- и газопроводов и бурения скважин в России также скопилось около 9-ти млн.т. отходов в отвалах и шламохранилищах.

Значительные объемы загрязняющих окружающую среду отходов, образующихся на предприятиях ТЭК, составляют золошлаковые отходы (ЗШО) от сжигания различных видов топлива: угля, торфа, горючих сланцев, рисовой шелухи. В России таких отходов образуется ежегодно около 40 млн.т., из которых 28 млн.т. – золы. К настоящему времени их скопилось около 2,0 млрд.т., которые занимают более 28 тысяч гектаров земли.

На предприятиях ТЭК ежегодно образуются десятки тысяч тонн шламов в процессе снижения жесткости воды на стадии предварительной химводоочистки. В 2010-ом году только на предприятиях ТЭК Республики Татарстан объем образовавшихся шламов химводоочистки составил более 76 тыс.т. [6]. В целом в России на предприятиях ТЭК ежегодно образуется по расчетам более 5,6 млрд.т. шламов химводоочистки.

Отходы ТЭК, хранящиеся в отвалах и шламохранилищах, наносят постоянный вред земляному покрову, воздушному бассейну, водам рек и озер в результате отчуждения больших площадей, засоления и минерализации земель и подземных и надземных вод, ухудшения гидрохимического режима водоемов. Связанные с этим экологические проблемы жизнедеятельности населения зависят от уровня утилизации отходов ТЭК в качестве сырьевых ресурсов в различных отраслях промышленности. В России к настоящему времени скопилось около 23 тыс.т. ядерных отходов расположенных на ее территории 10-ти атомных электростанций.

2.3. Отходы топливно-энергетического комплекса в производстве минеральных вяжущих веществ и строительных материалов на их основе

Самым мощным потребителем отходов ТЭК объективно является строительство и его базовая отрасль – промышленность строительных материалов, как самая материалоемкая [7-11]. Практически большая часть разновидностей строительных материалов – минеральных вяжущих, растворов, бетонов, сухих строительных смесей, керамических материалов, ситаллов и других производятся или могут производиться на основе или с добавками отходов добычи, обогащения и сжигания топливных ресурсов и шламов химводоочистки предприятий ТЭК. Постоянно образующиеся и накопленные в отвалах и шламохранилищах отходы добычи, транспортировки и обогащения угля, нефти, газа, сланцев и торфа используются в качестве сырьевых компонентов в производстве цементного клинкера, в качестве инертных и активных минеральных добавок к цементам и строительным материалам на их основе.

В производстве строительных материалов получили применение образующиеся на предприятиях ТЭК золошлаковые отходы сжигания твердых видов топлива [12, 13]. Наибольшее применение из этих отходов получила зола-унос, улавливаемая при сжигании большинства разновидностей топлива и представляющая собой тонкодисперсный материал, состоящий из частиц размером 5 – 100 мкм. [7-10, 14-17].

Применение золошлаков и золы-уноса в качестве добавок в составе портландцементов и бетонов регламентируется и межгосударственными стандартами (ГОСТ 25592 – 2019. Смеси золошлаковые тепловых электротанций для бетонов; ГОСТ 31108 – 2020 Цементы общестроительные. Технические условия; ГОСТ Р56828.26 – 2017. Наилучшие доступные технологии. Ресурсосбережение. Аспекты эффективного обращения с отходами в цементной промышленности; ГОСТ 25818 – 2017 Золы-унос ТЭС для бетонов).

Топливные шлаки и золошлаковые смеси применяются в виде мелких и крупных заполнителей в бетонах и растворах. Топливные шлаки в молотом состоянии и золы применяются и в производстве шлакощелочных вяжущих и геополимеров [18-24]. Отдельные разновидности таких вяжущих применяются в производстве бетонов для захоронения радиоактивных отходов [25].

Шламы гидроуглеобогащения и химводоочистки также являются ценным вторичным сырьевым ресурсом для производства цементов и местных бесцементных и малоцементных вяжущих – известково-зольных, известково-пуццолановых, известково-глинистых, сланцезольных, торфозольных, известковошлаковых и др. [26,27].

2.4. Цементная промышленность и отходы топливно-энергетического комплекса

Цемент вместе с бетоном – второй после воды наиболее употребляемый ресурс на земле [25], а цементная промышленность – одна из ведущих отраслей производства строительных материалов. Ежегодно в мире производится более 4 млрд.т. цемента.

В 80-х годах 20 века СССР занимал первое место в мире по производству портландцемента. Также он занимал первое место и по производству шлакопортландцемента, что позволяло сократить значительно расходы сырьевых и топливных ресурсов [7].

После резкого спада, отмечавшегося в 90-х годах 20 века, в последние десятилетия производство цемента систематически наращивалось. Этому способствовало и издание в России нормативных документов по ресурсо- и энергосбережению и обращению с отходами в цементной промышленности [ГОСТ 25592 – 2019. Смеси золошлаковые тепловых электротанций для бетонов; ГОСТ 31108 – 2020 Цементы общестроительные. Технические условия; ГОСТ Р56828.26 – 2017. Наилучшие доступные технологии. Ресурсосбережение. Аспекты эффективного обращения с отходами в цементной промышленности; ГОСТ 25818 – 2017 Золы-унос ТЭС для бетонов]. Достигнуты определенные успехи в освоении производства и новых разновидностей эффективных строительных материалов. Однако по объемам производства цемента Россия в настоящее время занимает 8-ое место среди стран мира, уступая Китаю в сорок раз. Китай в последние десятилетия занимает по производству цемента 1-е место в мире, ежегодно производя 2.0-2.2 млрд.т. – более половины его мирового производства. Очевидно, с этим связаны успехи китайской экономики в целом. В России этот показатель составляет около 55 млн.т. В отдельные годы импорт цемента в Россию из Белоруссии, Казахстана, Украины и других стран превышал его экспорт.

Со сложившимся уровнем производства минеральных вяжущих, в том числе – цемента, связано в определенной мере систематическое повышение цен на строительные материалы, что отражается на экономике страны в целом и ресурсном обеспечении ее экономического развития.

В 2021 г. строительный комплекс России достиг рекордного успеха в объеме жилищного строительства, увеличив его на 30% [28]. Этот успех достигнут на фоне систематического роста цен на строительные материалы, в том числе – на цемент, которые только с марта 2020 года по январь 2021 года выросли по всей стране на 70-75% [29].

Сложившийся к настоящему уровень производства цемента связан с состоянием предприятий цементной промышленности, в которой отмечаются отдельные недостатки:

– высокая энерго- и ресурсозатратность [30];

– высокий износ технологического оборудования, устаревшие технологии, низкая степень автоматизации производства [31];

– недостаточный уровень замены части клинкера минеральными добавками, использования альтернативных видов топлива и вторичных сырьевых ресурсов [32];

– уменьшение объемов производства шлакопортландцемента – до 2,5% и использование менее 4% золошлаковых отходов ТЭК в цементном производстве в 2020-ом году [33].

– В настоящее время в РФ в производстве и модификации строительных материалов используется около 15% золошлаковых отходов ТЭК. Этот показатель составляет в Китае 25%, а в странах Европы до 70%. Систематический рост стоимости строительных материалов в России ведет к снижению ее экономической конкурентоспособности в мире. Для предотвращения все увеличивающейся стоимости цементов и строительных материалов на их основе является необходимым:

– провести модернизацию техники и технологий цементных предприятий до современного мирового уровня;

– значительно – в разы – увеличить объемы производства цементов и строительных материалов на их основе;

– обеспечить мировой уровень ресурсо- и энергозатратности продукции цементных предприятий и промышленности строительных материалов за счет повышения

использования в производстве до 50-70% вторичного минерального сырья, включая золошлаковые отходы топливно-энергетического комплекса;

– снизить при этом уровень загрязнения окружающей среды отходами топливно-энергетического комплекса.

3. Заключение

Эффективное использование отходов топливно-энергетического комплекса в строительном производстве внесет существенный вклад в реализацию национальных проектов России «Экология», «Жилье и городская среда», «Безопасные и качественные автомобильные дороги», нацеленных на обеспечение комфортной среды для жизни..

Список литературы/ References

1. https://ru.m.wikipedia.org > wiki Топливно-энергетический комплекс России.[wiki Fuel and energy complex of Russia.]
2. Будущее мировой экономики. Доклад группы экспертов ООН во главе с В.Леонтьевым // М. Международные отношения. 1979 – 212 с.[The future of the world economy. Report of the UN group of experts headed by V. Leontiev // M. International relations. 1979 - 212 p]
3. Рахимов Р.З., Магдеев У.Х., Ярмаковский В.Н. Экология, научные достижения и инновации в производстве строительных материалов на основе и с применением техногенного сырья // строительные материалы. 2009, №12 – С. 3 – 5.[Rakhimov R.Z., Magdeev U.Kh., Yarmakovskiy V.N. Ecology, scientific achievements and innovations in the production of building materials based on and using technogenic raw materials // building materials. 2009, No. 12 – p. 3 - 5.]
4. https://m.realnoevremya.ru > articles Угольная отрасль России: перспективы и состояние[articles Russian coal industry: prospects and state.]
5. https://wonderware.ru > solutions Нефтегазодобывающая промышленность.[solutions Oil and gas industry]
6. Утилизации шлама химводоочистки на ТЭС. Монография / Казань. Николаева Л.А., Бородай Е.Н. Ресурсосберегающие технологии ГТЭУ, 2012 – 110 с.[Utilization of chemical water treatment sludge at thermal power plants. Monograph / Kazan. Nikolaeva L.A., Boroday E.N. Resource-saving technologies GTEU, 2012 - 110 p].
7. Боженов П.И. Комплексное использование минерального сырья и экология // М.: Изд-во АСВ, 1994 – 264 с.[Bozhenov P.I. Complex use of mineral raw materials and ecology // M.: Izd-vo DIA, 1994 - 264 p.]
8. Дворкин Л.И., Пашков И.А. Строительные материалы из отходов промышленности. // Ростов на Дону: Феникс, 2007 – 368 с.[Dvorkin L.I., Pashkov I.A. Building materials from industrial waste. // Rostov-on-Don: Phoenix, 2007 - 368 p.]
9. https://cybcrleninka.ru > article > an… Пичугин Е.А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот отходов теплоэлектростанций. 2019… [Pichugin E.A. Analytical review of the experience accumulated in the Russian Federation of involvement in the economic circulation of waste from thermal power plants. 2019.]
10. Котляр В.Д., Талпа Б.В.,Терехина Ю.В. Котляр А.В. Техногенное сырье для производства строительных материалов // Ростов на Дону, ДГТУ – 2014 – 203 с.[. Kotlyar V.D., Talpa B.V., Terekhina Yu.V. Kotlyar A.V. Technogenic raw materials for the production of building materials // Rostov-on-Don, DSTU - 2014 - 203 p.]
11. Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р. История науки и техники: Учебное пособие для ВО. 2-е издание / Санкт-Петербург: Лань, 2021 – 404 с.[Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R. History of Science and Technology: Textbook for VO. 2nd edition / St. Petersburg: Lan, 2021 - 404 p]
12. Худякова Л.И., Залуцкий А.В., Палкеев П.Л. Использование золошлаковых отходов тепловых электростанций // XXI век. Техносферная безопасность. 2010 №4/3 – с.375-391.[Khudyakova L.I., Zalutsky A.V., Palkeev P.L. The use of ash and slag waste from thermal power plants // XXI century. Technosphere safety. 2010 No. 4/3 - pp. 375-391.]
13. Соловьев Л.П., Пронин В.А. Утилизация зольных отходов тепловых электростанций // Современные наукоемкие технологии. 2011, №3 – с.40-42. [Solovyov L.P., Pronin V.A.

Utilization of ash waste from thermal power plants // Modern science-intensive technologies. 2011, No. 3 - p.40-42].
14. Ватин Н.И., Петросов Д.В., Калачев А.И., П.Лахтинян. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве / Magazine of Civil Ingineering. №4. 2011.[Vatin N.I., Petrosov D.V., Kalachev A.I., P. Lakhtinyan. The use of ashes and ash and slag waste in construction / Magazine of Civil Engineering. No. 4. 2011.]
15. Зырянов В.В. Зола-унос – техногенное сырье / М.: ИИЦ. 2009 – с.311.[Zyryanov V.V. Fly ash - technogenic raw materials / M.: IITs. 2009 - p.311.]
16. Yao Z.T., Ji X.S., Sacker P.K., Tang J.H., Ge L.O., Xia M.S., Xi Y.O. A.comprehensive review on the applications of coal fly ash // Earth – Science Review – 2015/
17. Sett R. Flyash; charactenstics, problems and positive utilization // Advances in Applied Scince Rescarch. 2017. Vol. 8 (3).
18. Глуховский В.Д., Пахомов В.А., Шлакощелочные вяжущие и бетоны / Киев: Будивельник, 1978 – 184 с.[Glukhovsky V.D., Pakhomov V.A., Slag-alkali binders and concretes / Kyiv: Budivelnik, 1978 - 184 p]
19. Рахимова Н.Р.Состояние и перспективные направления развития исследований и производства композиционных шлакощелочных вяжущих, растворов и бетонов / Строительные материалы. 2008. №9. С. 77-80.[. Rakhimova N.R. State and perspective directions of development of research and production of composite slag binders, mortars and concretes / Building materials. 2008. No. 9. pp. 77-80.]
20. Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р. Строительство и минеральные вяжущие прошлого, настоящего и будущего / строительные материалы, 2013, №5 – с.57-59. [Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R. Construction and mineral binders of the past, present and future / building materials, 2013, No. 5 - p.57-59]
21. Nematollahi B., Sanjayan J. Effect of different superplasticizers and activator combinations on workability and strength of fly ash based geopolymer // Materials and Design. 2014. Vol. 57.P.667-672.
22. Feng J.,Zhang R., Gong L., Li Y, CaO W, Cheng X Development of porous fly ash-based geopolumer with low thermal conductivity // Materials and Desigu.2015. Vol. 65. P.529-533
23. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z., Toward clean cement technologies: A review on alkali-activated fly-ash cements incorporated with supplementary materials, Journal of Non-Crystalline Solids 509 (2019) 31-41.
24. Makarenko S.V., Lozovsky B.M., Khokhryakov O.V., Khozin V.G., Borovskikh I.V. Prospects for the use of ash-alkali binders in the production of building materials by the method of semi-dry pressing, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Cep. "International Baikal Investment and Construction Forum "Spatial Restructuring of Territories"" 2021. P. 012120.[Makarenko S.V., Lozovsky B.M., Khokhryakov O.V., Khozin V.G., Borovskikh I.V. Prospects for the use of ash-alkali binders in the production of building materials by the method of semi-dry pressing, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Cep. "International Baikal Investment and Construction Forum "Spatial Restructuring of Territories"" 2021. P. 012120.]
25. Rahman R.O.A., Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R., Ojovan M.I. Cementitious materials for nuclear wastes immobilization, Wiley, 2015. – p.231.
26. Малоцементные и бесцементные вяжущие и мелкозернистые бетоны различного назначения из вторичных минеральных ресурсов / С.И.Павленко и др.; отв. Ред. В.А.Полубояров; Министерство образования и науки РФ: Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Сиб. гос. индустр. ун-т // Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010 – 323 с.[. Low-cement and cementless binders and fine-grained concretes for various purposes from secondary mineral resources / S.I. Pavlenko et al.; resp. Ed. V.A. Poluboyarov; Ministry of Education and Science of the Russian Federation: Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS, Sib. state industry un-t // Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2010 - 323 p.]
27. Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р., Халиуллин М.И., Гайфуллин А.Р. Отходы промышленности и экологическая безопасность строительства и городского хозяйства // Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства. 2015. №2 (38) – с. 97-102.[Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R., Khaliullin M.I., Gaifullin A.R. Industrial

wastes and ecological safety of construction and municipal economy // Ecological safety of construction and municipal economy. 2015. No. 2 (38) - p. 97-102].
28. Проблема технического регулирования в строительстве в рамках 100 + Technobuild // Строительная газета, №39, 08.10.2021.[The problem of technical regulation in construction within the framework of 100 + Technobuild // Stroitelnaya gazeta, No. 39, 08.10.2021].
29. Щеглов А. Эффективного ответа на удорожаение строительных материалов пока не найдено // строительная газета, №27 (10654), 16.07.2021.[Shcheglov A. An effective response to the rise in the cost of building materials has not yet been found // construction newspaper, No. 27 (10654), 07/16/2021]
30. Витт О.С. Современное состояние отечественной цементной промышленности и проблемы ее конкурентоспособности // Стратегия развития экономики. 2011. №17 (110), с.48-51.[Witt O.S. The current state of the domestic cement industry and the problems of its competitiveness // Strategy for the development of the economy. 2011. No. 17 (110), pp. 48-51.]
31. Шевченко И.В., Григорьева Е.А. Реструктуризация предприятий и отраслей промышленного производства Красноярского края (по материалам цементной промышленности) / Стратегия развития экономики. 2011. №17 (110), с.52-55.[Shevchenko I.V., Grigorieva E.A. Restructuring of enterprises and industries in the Krasnoyarsk Territory (based on the materials of the cement industry) / Strategy for the development of the economy. 2011. No. 17 (110), pp. 52-55.]
32. Скобло Л.И. Цементная промышленность на постсоветском пространстве сегодня. Обозрение // Цемент и его применение. 2018. №1 с.26-28.[Skoblo L.I. The cement industry in the post-Soviet space today. Review // Cement and its application. 2018. No. 1 p.26-28.
33. Василик Ш.Ю., Еремина Е.М. Цементная промышленность в 2020 году, Цемент и его применение. 2020. №6.[Vasilik Sh.Yu., Eremina E.M. Cement industry in 2020, Cement and its application. 2020. №6.]

Информация об авторах

Рахимов Равиль Зуфарович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
e-mail: rahimova.07@list.ru

Information about the authors

Ravil Z. Rakhimov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
e-mail: rahimova.07@list.ru

УДК: 691.175.743
DOI: 10.52409/20731523_2022_3_75
EDN: IHYITF

Древесно-полимерные композиты на основе поливинилхлорида, усиленные базальтовой фиброй

А.Г. Хантимиров[1], Л.А. Абдрахманова[1], Р.К. Низамов[1], В.Г. Хозин[1]
[1]Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Главной проблемой древесно-полимерных композитов является значительное ухудшение свойств при введении органического наполнителя в количестве 50 м.ч. и более, что требует применения эффективных модификаторов. Общеизвестна положительная роль различных волокнистых модификаторов для древеснонаполненных композитов на основе полипропилена и полиэтилена, однако их влияние на поливинилхлоридные составы изучено недостаточно. Цель работы заключается в исследовании свойств и структуры древесно-полимерных композитов на основе поливинилхлорида, модифицированных коротковолокнистой базальтовой фиброй. Задачами исследования являются: создание армированных древесно-полимерных композитов с равномерным распределением волокон наполнителя, а также оценка влияния базальтовой фибры на физико-механические свойства композитов.
Результаты. В работе представлены результаты исследований древесно-полимерных композитов на основе поливинилхлорида, усиленных коротковолокнистой базальтовой фиброй. Данные электронной микроскопии показали равномерное распределение волокон базальтовой фибры по объему исследуемых образцов. Модификация древесно-полимерных композитов привела к увеличению прочности на изгиб на 22% и снижению водопоглощения на 32%.
Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что за счет улучшения наиболее важных физико-механических показателей древесно-полимерных композитов на основе поливинилхлорида может быть расширена область применения данных видов изделий.

Ключевые слова: поливинилхлорид, древесно-полимерный композит, базальтовая фибра, волокнистый модификатор, сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионный анализ.

Для цитирования: Хантимиров А.Г., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К., Хозин В.Г. Древесно-полимерные композиты на основе поливинилхлорида, усиленные базальтовой фиброй // Известия КГАСУ 2022 № 3 (61). С.75-81, DOI: 10.52409/20731523_2022_3_75
EDN: IHYITF

Wood-polymer composites based on polyvinyl chloride reinforced with basalt fiber

A.G. Khantimirov[1], L.A. Abdrakhmanova[1], R.K. Nizamov[1], V.G. Khozin[1]
[1]Kazan State University of Architecture and Engineering

Abstract: *Problem statement*. The paper presents the results of studies of wood-polymer composites (WPC) based on polyvinyl chloride (PVC) reinforced with short-fiber basalt fiber. The positive role of various fibrous fillers for WPC based on polypropylene and polyethylene is well known, but their effect on polyvinyl chloride WPC is poorly understood. The purpose of the work is to study PVC-WPC modified with short-fiber basalt fiber. The objectives of the

study are: the creation of reinforced WPC with a uniform distribution of filler fibers, as well as the assessment of the influence of basalt fiber on the physical and mechanical properties of composites.
Results. Electron microscopy data showed a uniform distribution of basalt fiber over the volume of the composite. The modification of the WPC led to an increase in bending strength by 22% and a decrease in water absorption by 32%.
Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry consists in expanding the scope of WPC application by increasing the physical and mechanical properties of products.

Keywords: polyvinyl chloride, wood-polymer composite, basalt fiber, fiber modifier, scanning electron microscopy, energy dispersion analysis.

For citation: Khantimirov A.G., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K, Khozin V.G. Wood-polymer composites based on polyvinyl chloride reinforced with basalt fiber // News KSUAE 2022 № 3(61) P. 75-81, DOI: 10.52409/20731523_2022_3_75, EDN: IHYITF

1. Введение

За последние два года на российском рынке строительных материалов наблюдается резкий рост востребованности древесно-полимерных композитов (ДПК). Это связано как с рекордными темпами развития самой строительной отрасли, особенно частного домостроения, так и с кратным увеличением цен на пиломатериалы, что подталкивает покупателей искать более выгодные альтернативы с финансовой и эксплуатационной точек зрения.

ДПК представляют собой композиционный материал на основе термопластичных полимеров и органического наполнителя, главным образом, древесной муки, получаемой измельчением отходов лесопромышленной отрасли. Соответственно, увеличивая содержание наполнителя в ДПК, можно уменьшить себестоимость конечных изделий, сделав их более доступными для потребителей [1].

Введение древесной муки свыше 40-50 м.ч. заметно ухудшает технологические и эксплуатационные свойства ДПК [2], поэтому для нивелирования негативных последствий применяют различные способы модификации. Модификаторы могут отличаться по природе, морфологии, размеру и форме частиц. В литературе довольно широко описаны [3–6] результаты модификации ДПК наноразмерными и мелкодисперсными добавками, играющими в композициях роль связующих агентов. Однако их применение зачастую создает дополнительные сложности с равномерным распределением по объему композита из-за введения в малых дозах. Поэтому все чаще в качестве модификаторов в ДПК используют различные волокнистые наполнители, которые вводятся в средних дозировках и не требуют изменений в технологической цепочке производства. Эффективными могут быть органические волокна [7–9], углеродная [10–12], стеклянная [11,13] или базальтовая фибры [14–18].

В работе [18] была изучена зависимость свойств ДПК от содержания базальтовой фибры с длиной волокон 3 и 12 мм. Исследования выявили, что прочность при растяжении имеет максимальные значения при содержании фибры 15-25%, прочность при изгибе - при 20-30% независимо от длины волокон. Было обнаружено неравномерное распределение фибры при содержании фибры свыше 30%. Комплексное улучшение свойств приходится на диапазон 15-30% при введении базальтовой фибры с длиной волокон 12 мм.

Авторами [16] в качестве волокнистого модификатора для ДПК на основе полиэтилена (ПЭ) были использованы базальтовые волокна длиной 6 мм, обработанные связующим агентом винилтриэтоксисиланом для улучшения адгезии между полимерной и древесной составляющими. Оказалось, что прочность при изгибе и ударные свойства значительно увеличиваются при использовании 4 мас.% модифицированных базальтовых волокон.

В работе [14] проведены исследования по совместному введению базальтовой фибры и древесного волокна в соотношении 1:1 в композит на основе полипропилена (ПП). Введение 10 мас.% смеси древесных и базальтовых волокон привело к двукратному

увеличению модуля упругости и увеличению прочности при растяжении на 30%. Линейный коэффициент теплового расширения снизился почти в три раза для композитов с общим содержанием волокон 20 мас.%.

Введение базальтовой фибры в состав ДПК на основе ПП и ПЭ значительно улучшает физико-механические свойства. Однако, с точки зрения эксплуатационных характеристик наиболее выгодным полимером для ДПК строительного назначения является поливинилхлорид (ПВХ) [19–21], но на данный момент исследования по модификации их базальтовой фиброй отсутствуют, чему и посвящена данная статья.

Целью работы является изучение поливинилхлоридных древесно-полимерных композитов, усиленных коротковолокнистой базальтовой фиброй.

Объектом исследований являются модифицированные базальтовой фиброй древесно-полимерные композиты на основе ПВХ. Предмет исследований – влияние базальтовой фибры на структуру и физико-механические свойства ДПК-ПВХ.

Задачами исследования являются:

– получение модифицированных ДПК с равномерным распределением волокнистого наполнителя;

– исследование влияния базальтовой фибры на структуру и физико-механические свойства ДПК на основе ПВХ.

2. Материалы и методы

В исследованиях был использован суспензионный ПВХ марки С-7059-М (ГОСТ 14332-78), комплексный стабилизатор – двухосновный стеарат свинца AKSTAB Pb BLS 51 (CAS 56189-09-4), стабилизатор-смазка – стеарат кальция (ТУ 6-09-4104-87), акриловый модификатор ударной прочности марки KaneAce FM50, древесная мука из хвойных пород марки М180 (ГОСТ 16361-87).

В качестве модификатора использовалась базальтовая фибра компании ООО «Цеммикс» диаметром волокон 8-10 мкм и длиной 100-500 мкм, обработанная в процессе производства силановым замасливателем КВ-42.

Составы экспериментальных композиций представлены в табл. 1.

Таблица 1

Составы экспериментальных композиций

Компонент	Содержание, м.ч.				
ПВХ С-7059-М	100				
Модификатор ударной прочности FM-50	7				
Стабилизатор-смазка стеарат кальция (StCa)	3				
Термостабилизатор двухосновный стеарат свинца (ДОСС)	5				
Древесная мука М180 (ДМ)	50				
Базальтовая фибра	0	0,5	2,5	5	7,5

Для исследований ПВХ-композиций были получены экструдированные образцы на лабораторном двухшнековом экструдере LabTechScientific LTE 16-40 с фильерой сечением 2х22 мм. Все серии образцов перерабатывались со скоростью вращения шнеков 20 об/мин при одинаковом профиле температур зон экструдера с температурой расплава при выходе из фильеры 200^{o}С. Композиция перерабатывалась в экструдере в течение 10-15 минут.

Микроструктура экструдатов изучалась с помощью высокоразрешающей сканирующей электронной микроскопии на микроскопе «Merlin» компании «CarlZeiss». Элементный состав образцов был определен с помощью спектрометра энергетической дисперсии «INCA X-MAX».

Технологические и эксплуатационные свойства образцов композитов на основе ПВХ изучались в соответствии с действующими стандартами, приведенными в табл.2.

Таблица 2

Применяемые нормативные документы

ГОСТ	Названия ГОСТ и основные определяемые характеристики
4648-2014	Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб
11262-2017	Пластмассы. Метод испытания на растяжение
4650-2014	Пластмассы. Методы определения водопоглощения
11012-2017	Пластмассы. Метод испытания на абразивный износ
4670-2015	Пластмассы. Определение твердости. Метод вдавливания шарика
15139-69	Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы)

3. Результаты и обсуждение

Для композитов с волокнистыми наполнителями важно их равномерное распределение по объему, так как при переработке возможно спутывание волокон в клубки, вследствие чего ухудшаются свойства изделий. Из представленной микрофотографии (рис.1) видно, что фибра достаточно равномерно распределяется по объему композита без спутывания волокон.

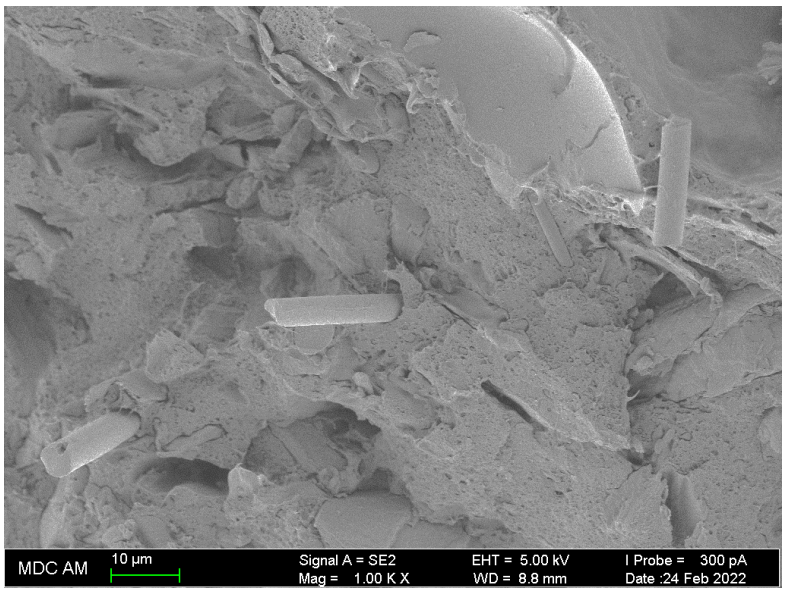


Рис. 1. Микрофотография поверхности хрупкого скола образца с 7,5 м.ч. базальтовой фибры (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Microphotography of the surface of a brittle chip of a sample with 7.5 phr basalt fiber (illustration by the authors)

Результаты испытаний физико-механических характеристик экструдированных ДПК-образцов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний экструдированных ДПК

Показатель	Содержание фибры в композициях, м.ч.				
	0	0,5	2,5	5	7,5
Прочность при растяжение, МПа	31	31	31	31	33
Прочность при изгибе, МПа	50	55,4	57,2	58	61,2
Истирание, мкм	216	224	229	231	235
Водопоглощение, %	1,68	1,47	1,42	1,32	1,30
Плотность, г/см^3	1,16	1,18	1,19	1,19	1,22
Твердость по Бринеллю, кг/см^2	85	86	86	87	87
Разбухание экструдата	1,05	1,01	1,02	1,02	1,03

Прочность при растяжении незначительно возросла для композиции с 7,5 м.ч. фибры, для остальных концентраций данный показатель остался на уровне исходной композиции. Это объясняется тем, что длины волокон фибры, близкой к среднему размеру древесных частиц, недостаточно для эффективного сопротивления разрывающим усилиям.

Ожидаемо увеличилась прочность при изгибе, которая возрастала по мере роста содержания волокон, максимальный прирост составил 22% при концентрации 7,5 м.ч. Для данной концентрации также характерен максимальный прирост средней плотности за счет уменьшения количества пустот, которое происходит благодаря их заполнению и армированию самого композита волокнами, что приводит к снижению водопоглощения на 32%. Значение показателя разбухания имеет минимальное значение с 0,5 м.ч. фибры, при дальнейшем увеличении содержания фибры разбухание возрастает. Твердость по Бринеллю у модифицированных образцов остается на уровне исходной композиции.

Однако, заметно, что в присутствии модификатора происходит увеличение абразивного износа, показатель истирания возрастает на 17% при максимальной концентрации фибры. Для объяснения данного явления был проведен элементный анализ поверхности волокон, введенных в матрицу ПВХ. На поверхности волокон благодаря силановому замасливателю адсорбируются макромолекулы ПВХ, что следует из наличия в спектральном графике элемента хлора, кроме основных элементов, принадлежащих минеральному волокну (Si, Al, Mg, Ca и др.). Из полученных данных по истиранию можно сделать вывод о том, что при достаточно глубоком внедрении истирающего элемента (с учетом того, что волокна фибры достаточно короткие) вероятно, происходят не только разрывы древесного волокна и волокон фибры, но и извлечение их на поверхность вместе с прочно закрепленной полимерной матрицей, что и приводит к большему истиранию образца.

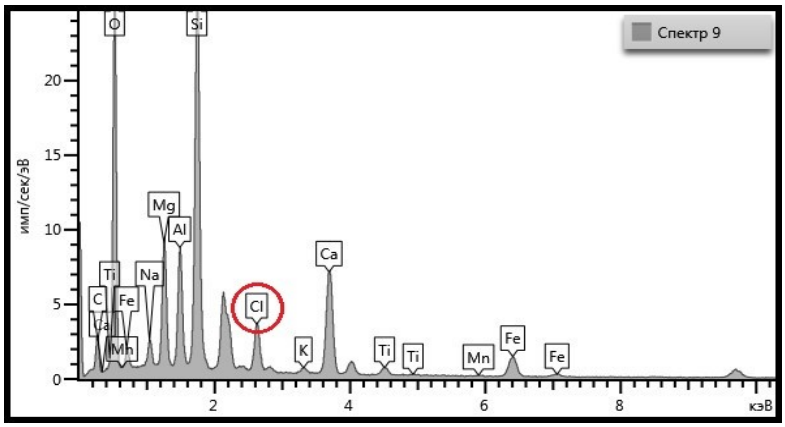


Рис. 2. Спектр хрупкого скола образца на поверхности базальтовой фибры (иллюстрация авторов)
Fig. 2. The spectrum of brittle cleavage of the sample on the surface of basalt fiber (illustration by the authors)

4. Заключение

Анализ микрофотографий модифицированных фиброй композитов показал, что стандартных операций по приготовлению смеси (смеситель) и ее переработке в композит (экструдер) достаточно для равномерного распределения волокон фибры длиной 100-500 мкм по объему изделий. Таким образом, отсутствует необходимость применения дополнительного технологического оборудования на производстве.

По комплексу прочностных характеристик наилучшие значения наблюдаются для композиций с содержанием фибры в количестве 7,5 м.ч. Прочность при растяжении возросла на 6%, при изгибе на 22%. С увеличением концентрации фибры снижается водопоглощение и увеличивается плотность. Единственным отрицательным фактором модификации является рост абразивного износа образцов. Однако, в случае применения разработанных композиций в качестве облицовочных стеновых и звукоизоляционных панелей, комплектующих и профильно-погонажных изделий для внутренней отделки

такой рост истираемости не является критичным. Слишком короткая длина волокон 100-500 мкм даже при высокой адгезии полимера не способна заметно улучшить прочность при растяжении. В связи с этим, дальнейшие исследования будут направлены на модификацию ДПК-ПВХ базальтовыми волокнами большей длины.

Список литературы/ References

1. Никольская В. Дополнительная нагрузка для ДПК // ЛесПром Информ. 2021. Т. 157, № 3. С. 80–86 [Nikolskaya V. Additional load for TPC // LesProm Inform. 2021. Vol. 157, Iss. 3. P. 80–86]
2. Колесникова И.В. и др. Получение высоконаполненных древесно-полимерных композитов на основе ПВХ // Известия ВУЗов. Строительство. 2010. № 11–12. С. 32–37 [Kolesnikova I.V. et al. Obtaining highly filled wood-polymer composites based on PVC // Izvestiya VUZov. Construction. 2010. Iss. 11-12. P. 32-37]
3. Lu Y., Feng M., Zhan H. Preparation of SiO2–wood composites by an ultrasonic-assisted sol–gel technique // Cellulose. 2014. Vol. 21, № 6. Iss. 4393–4403.
4. Kokta B. et al. Composites of polyvinyl chloride-wood fibers // Polym. Technol. Mater. 1990. Iss. 29. P. 87–118.
5. Xu Y. et al. Creep behavior of bagasse fiber reinforced polymer composites // Bioresour. Technol. Elsevier Ltd, 2010. Vol. 101, Iss. 9. P. 3280–3286.
6. Исламов А.М. и др. Древесно-полимерные композиты на основе поливинилхлорида, модифицированные аэросилом // Известия КГАСУ. 2016. Т. 4, № 38. С. 382–387 [Islamov A.M. et al. Wood-polymer composites based on polyvinyl chloride modified with aerosil // Izvestiya KGASU. 2016. Vol. 4, Iss. 38. P. 382–387]
7. Ashori A., Kiani H., Mozaffari S.A. Mechanical properties of reinforced polyvinyl chloride composites : Effect of filler form and content // J. Appl. Polym. Sci. 2011. Vol. 120. P. 1788–1793.
8. Zhang J. et al. The properties of flax fiber reinforced wood flour / high density polyethylene composites // J. For. Res. Springer Berlin Heidelberg, 2017. Vol. 29, Iss. 2. P. 533–540.
9. Мухин Н.М. и др. Реология древесно - полимерных композитов с полиэтиленовой матрицей и целлюлозсодержащими наполнителями // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 15. С. 60–63 [Mukhin N.M. et al. Rheology of wood - polymer composites with a polyethylene matrix and cellulose-containing fillers // Bulletin of the Technological University. 2015. Vol. 18, Iss. 15. P. 60–63]
10. Guo G., Finkenstadt V.L., Nimmagadda Y. Mechanical properties and water absorption behavior of injection-molded wood fiber / carbon fiber high-density polyethylene hybrid composites // Adv. Compos. Hybrid Mater. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2019. Iss. 2. P. 690–700.
11. Guo G., Kethineni C. Direct injection molding of hybrid polypropylene / wood-fiber composites reinforced with glass fiber and carbon fiber // Int. J. Adv. Manuf. Technol. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. Vol. 39, Iss. 9.
12. Seo Y.-R. et al. Hybrid Effects of Carbon Fiber and Nanoclay as Fillers on the Performances of Recycled Wood-Plastic Composites // BioResources. 2020. Vol. 15, Iss. 4. P. 7671–7686.
13. Jeamtrakull S. et al. Effects of wood constituents and content, and glass fiber reinforcement on wear behavior of wood/PVC composites // Compos. Part B. Elsevier Ltd, 2012. Vol. 43, Iss. 7. P. 2721–2729.
14. Kufel A., Kuciel S. Basalt/Wood Hybrid Composites Based on Polypropylene: Morphology, Processing Properties, and Mechanical and Thermal Expansion Performance // Materials (Basel). 2019. Iss. 12. P. 2557–2570.
15. Zhang X., Huang R. Thermal Decomposition Kinetics of Basalt Fiber-Reinforced Wood Polymer Composites // Polymers (Basel). 2020. Vol. 2283, Iss. 12. P. 1–15.
16. Lu G., Wang W., Shen S. Mechanical Properties of Wood Flour Reinforced High Density Polyethylene Composites with Basalt Fibers // Mater. Sci. 2014. Vol. 20, Iss. 4. P. 464–467.
17. Хузиахметова К.Р. и др. Особенности наполнения композиций ПВХ // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84, № 1. С. 252–258 [Khuziakhmetova K.R. et al. Features of filling PVC compositions // Vestnik VGUIT. 2022. Vol. 84, Iss. 1. P. 252–258]
18. Chen J. et al. Development of Basalt Fiber Reinforced Wood-plastic Composite Materials // Adv. Mater. Res. 2011. Vol. 193. P. 4043–4048.

19. Мацеевич Т.А., Аскадский. А.А. Механические свойства террасной доски на основе полиэтилена, полипропилена и поливинилхлорида // Строительство наука и образование. 2017. Т. 24, № 3. С. 48–59 [Matseevich T.A., Askadsky. A.A. Mechanical properties of a decking based on polyethylene, polypropylene and polyvinyl chloride // Stroitel'stvo nauka i obrazovanie. 2017. Vol. 24, Iss. 3. P. 48-59]
20. Мацеевич Т.А., Аскадский А.А. Террасные доски: состав, изготовление, свойства. Часть 1. Механические свойства // Строительные материалы. 2018. № 1–2. С. 101–105 [Matseevich T.A., Askadsky A.A. Terraced boards: composition, manufacture, properties. Part 1. Mechanical properties // Stroitel'nye materialy. 2018. Iss. 1-2. P. 101-105]
21. Saddem M. et al. Effect of fiber and polymer variability on the rheological properties of wood polymer composites during processing // Polym. Compos. 2019. Vol. 40. P. E609–E616.

Информация об авторах

Аяз Габдрашитович Хантимиров, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: khantimirov94@ kgasu.ru
Ляйля Абдулловна Абдрахманова, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: laa@kgasu.ru
Рашит Курбангалиевич Низамов, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: Nizamov@kgasu.ru
Вадим Григорьевич Хозин, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: khozin.vadim@yandex.ru

Information about the authors

Ayaz G. Khantimirov, post-graduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
Email: khantimirov94@ kgasu.ru
Lyaylya A. Abdrakhmanova, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
Email: laa@kgasu.ru
Rashit K. Nizamov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
Email: Nizamov@kgasu.ru
Vadim G. Khozin, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
Email: khozin.vadim@yandex.ru

УДК: 691.175.743
DOI: 10.52409/20731523_2022_3_82
EDN: JDAYJE

Структура смесей полимеров на основе поливинилхлорида

К.Р. Хузиахметова[1] , Л.А. Абдрахманова[1], Р.К. Низамов[1], Л.И. Потапова[1]
[1]Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Смеси полимеров обладают свойствами, превосходящими свойства каждого компонента по отдельности, что связано с межфазными взаимодействиями двух полимеров. Основные исследования в области смесей полимеров направлены на изучение структуры композитов, подверженных ударным и растягивающим нагрузкам. Структура и механизм разрушения определяются соотношением компонентов в смеси полимеров. Поэтому целью исследования является изучение структуры смесей полимеров на основе поливинилхлорида и тройного сополимера акрилонитрил-бутадиен-стирола. Задачами исследования являются: изучение химического состава порошкообразного акрилонитрил-бутадиен-стирола и экструдированных смесей полимеров поливинилхлорида / акрилонитрил-бутадиен-стирола методом ИК-спектроскопии; сравнение структурных особенностей поливинилхлоридных-композиций при разных концентрациях акрилонитрил-бутадиен-стирола.
Результаты. Оценена структура акрилонитрил-бутадиен-стирола методом ИК-спектроскопии, определяющая условия совместимости с поливинилхлоридом. Рассмотрено влияние разных концентраций акрилонитрил-бутадиен-стирола на структуру поливинилхлорид-композиций. При введении акрилонитрил-бутадиен-стирола до 20 мас.ч. наблюдается формирование микрогетерогенной структуры композита, а при введении 50 и 100 мас.ч. акрилонитрил-бутадиен-стирола на 100 мас.ч. поливинилхлорида выявлено образование непрерывной фазы двух полимеров, что подтверждено результатами энегодисперсионного анализа.
Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что при формировании непрерывной фазы смеси полимеров обеспечивается высокая ударная прочность конечного изделия по сравнению с композициями на основе индивидуальных полимеров (поливинилхлорида или акрилонитрил-бутадиен-стирола).

Ключевые слова: поливинилхлорид, акрилонитрил-бутадиен-стирол, смеси полимеров, профильно-погонажные изделия, структура, ИК-спектроскопия, сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионный анализ.

Для цитирования: Хузиахметова К.Р., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К., Потапова Л.И. Структура смесей полимеров на основе поливинилхлорида // Известия КГАСУ 2022 № 3(61) С. 82-89, DOI: 10.52409/20731523_2022_3_82, EDN: JDAYJE

Structure of polymer blends based on polyvinyl chloride

K.R. Khuziakhmetova[1], L.A. Abdrakhmanova[1], R.K. Nizamov[1], L.I. Potapova[1]
[1]Kazan State University of Architecture and Engineering

Abstract: The paper presents the results of the study of the structure of polymer blends based on polyvinyl chloride (PVC). Mixtures of polymers have properties superior to the properties of each component separately, which is associated with the interfacial interactions of the two polymers. The main research in the field of polymer blends is aimed at studying the structure of

composites subjected to shock and tensile loads. The structure and fracture mechanism are determined by the ratio of components in the polymer mixture. Therefore, the aim of the study is to investigate the structure of polymer blends based on PVC and acrylonitrile butadiene styrene (ABS) triple copolymer. The objectives of the study are: studying the chemical composition of powdered ABS and extruded PVC/ABS polymer mixtures by infrared spectroscopy; comparing the structural features of PVC compositions at different concentrations of ABS.

The main results of the study are that the structure of ABS by infrared spectroscopy, which determines the conditions of compatibility with PVC, has been evaluated. The effect of different concentrations of ABS on the structure of PVC compositions was considered. When adding ABS up to 20 phr the formation of a microheterogeneous structure of the composite is observed, and when adding 50 and 100 phr of ABS per 100 phr of PVC the formation of a continuous phase of two polymers was detected, which was confirmed by the results of enegodispersion analysis.

The significance of the obtained results for the construction industry is that the formation of continuous phase of polymer mixture provides high impact strength of the final product compared to compositions based on individual polymers (PVC or ABS).

Key words: polyvinyl chloride, acrylonitrile-butadiene styrene, polymer mixtures, profile-finished products, structure, FTIR-spectroscopy, scanning electron microscopy, energy dispersive analysis.

For citation: Khuziakhmetova K.R., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K., Potapova L.I. Structure of polymer mixtures based on polyvinyl chloride // News KSUAE 2022 № 3(61) p. 82-89, DOI: 10.52409/20731523_2022_3_82, EDN: JDAYJE

1. Введение

На сегодняшний день одним из наиболее простых способов получения материалов с новыми свойствами является смешение. Смеси полимеров стали центральной частью науки из-за относительно низкой стоимости данного технологического решения по сравнению с синтезом нового полимера [1].

Поливинилхлорид (ПВХ), как широко используемый термопластичный полимер строительного назначения [2], нуждается в модификации вследствие присущей ему восприимчивости к термической деструкции, хрупкости и низкой температуры тепловой деформации (около 60 °С), обусловленной аморфным характером [3].

Основную долю промышленных составов представляют смеси ПВХ с модификаторами, синтезированными по типу «ядро-оболочка», в которых «оболочка» - акриловый полимер, повышающий температуру тепловой деформации, температуру стеклования и обеспечивающий совместимость с ПВХ, а «ядро» - бутадиен, поглощающий и рассеивающий энергию ударных нагрузок [4–6]. Ярким представителем модификаторов «ядро-оболочка» является акрилонитрил-бутадиен-стирол (АБС). Вследствие сочетания прочностных свойств и морозостойкости бутадиена, а также жесткости и термостабильности стирол-акрилонитрила, АБС широко используется как модификатор физико-механических и теплофизических свойств ПВХ, что также позволяет повысить текучесть расплава при переработке [7,8]. На данный момент достаточно широко изучено поведение смесей полимеров ПВХ/АБС к ударным нагрузкам, что подтверждает эффективность использования в строительстве [9].

Известно, что эксплуатационные свойства смесей полимеров зависят от фазового поведения компонентов. Экспериментально установлено, что на границе раздела двух полимеров имеется переходный слой [10]. Кулезнев В.Н. отмечал, что образование переходного слоя связано с сегментальной растворимостью [11], а согласно теории Воюцкого С.С., в пределах ограниченной взаиморастворимости имеет место частичная диффузия макромолекул [12], в результате чего при наличии нескольких термодинамически несовместимых полимеров образуется граничный слой, в значительной степени определяющий свойства композиционного материала [13].

Смеси полимеров ПВХ/АБС являются гетерогенными. В работе [14] была изучена природа совместимости ПВХ и АБС. Сообщалось, что оптимальная совместимость

смесей полимеров может быть достигнута при 12-26 % акрилонитрила в составе АБС. Снизить гетерогенность смесей возможно введением малых доз компатибилизаторов [15].

Морфологические наблюдения [16] показали, что с увеличением концентрации АБС от 5 до 10 %, поверхность разрушения после удара была представлена в виде перекрывающих друг друга шероховатых пластин. При введении 50 % АБС на разрушенных поверхностях выявили равномерную дисперсию [17].

В работе [18] представлена структура смесей полимеров ПВХ/АБС, подвергнутых растяжению. Введение 20 % АБС способствует формированию структуры, подобной сферолитам со скрученными гребнями, которые могут быть отнесены к остаткам крейзов, а при 30 % – морфология напоминает гофрированные гребни как проявление крейзов.

Следует отметить, что в вышеописанных работах изучалась поверхность излома после ударного или растягивающего разрушения. Однако морфология поверхности до и после разрушения может отличаться. В связи с этим, особую актуальность приобретают исследования, направленные на изучение структуры смесей полимеров в широкой области концентраций для прогнозирования свойств создаваемых материалов, что и является целью данного исследования.

Объект исследования – смеси полимеров на основе ПВХ. Предмет исследований – особенности структурного поведения смесей полимеров на основе ПВХ в зависимости от концентрации АБС.

Задачами исследования являются:

– изучение химического состава порошкообразного АБС и экструдированных смесей полимеров ПВХ/АБС методом ИК-спектроскопии;
– сравнение структурных особенностей ПВХ-композиций при разных концентрациях АБС.

2. Материалы и методы

Рецептуры исследуемых композиций включали в себя суспензионный ПВХ марки С-6359-М (ГОСТ 14332-78), комплексный стабилизатор – двухосновный стеарат свинца марки AKSTAB Pb BLS 51 (CAS 56189-09-4), стабилизатор-смазку – стеарат кальция (ТУ 6-09-4104-87) и модификатор ударной прочности и перерабатываемости – АБС марки АБС-20П. Расчет компонентов велся на 100 мас.ч. ПВХ. Введение АБС осуществлялось в количестве 0, 20, 50 и 100 мас.ч.

Для исследования ПВХ-композиций были получены образцы в виде плоских профилей, которые изготавливались на экструдере LabTechScientific LTE 16-40 при температуре 190-200 °С и скорости вращения шнеков 16, 20 и 25 об/мин.

Регистрацию ИК-спектра порошкообразного АБС и экструдированных смесей полимеров ПВХ/АБС проводили на Фурье-спектрометре «Spectrum 65» производства «Perkin-Elmer» с помощью приставки НПВО «Miracle ATR» (кристалл ZnSe) с диапазоном волновых чисел 4000-600 $см^{-1}$ при 20 сканах. Осуществление записи и вычитания фонового спектра производилась автоматически. Порошок АБС и экструдированные смеси полимеров ПВХ/АБС прижимались к кристаллу НПВО прижимом, входящим в комплект приставки. После регистрации автоматически осуществлялись НПВО-коррекция и сохранение спектра для последующего анализа полученных данных.

Поверхность скола экструдированных ПВХ-композиций исследовалась на сканирующем электронном микроскопе «Merlin» компании «CarlZeiss». Измерение проводилось при ускоряющем напряжении первичных электронов 5 кВ и зондовом токе 300 пА для минимального воздействия на объект исследования. Образцы помещались в жидкий азот, после чего производился скол. Сколы образцов фиксировались на держателе и помещались в камеру вакуумной установки «Quorum Q 150TES». Нанесение проводящего слоя проводилось методом катодного распыления сплавом Au/Pd в соотношении 80/20. Толщина нанесенного слоя составила 15 нм. При помощи спектрометра энергетической дисперсии «INCA X-MAX» был исследован элементный состав образцов на различных участках композита с фиксацией азота (N), как реперного элемента в составе АБС, и хлора (Cl), указывающий на наличие ПВХ.

3. Результаты и обсуждение

ИК-спектр порошкообразного АБС приведен на рис. 1. В области 3105-3027 $см^{-1}$ полосы пропускания свидетельствуют о наличии валентных колебаний фенильной группы CH, а интервал 2921-2849 $см^{-1}$ – о присутствии валентных колебаний групп CH_2. Ярко выражена частота 1494 $см^{-1}$, указывающая на внеплоскостные деформационные колебания группы CH_2, и 1453 $см^{-1}$ – соответствующая деформационным колебаниям группы CH_2.

Наличие бутадиеновой группы подтверждают полосы 966 $см^{-1}$ и 911 $см^{-1}$, относящиеся к внеплоскостным деформационным колебаниям группы CH. На присутствие стирольных групп указывают пики 760 $см^{-1}$ и 699 $см^{-1}$, соответствующие внеплоскостным деформационным колебаниям фенильной группы CH. Полоса 2237 $см^{-1}$ связана с валентными колебаниями нитрильной группы C≡N, характерной для акрилонитрила.

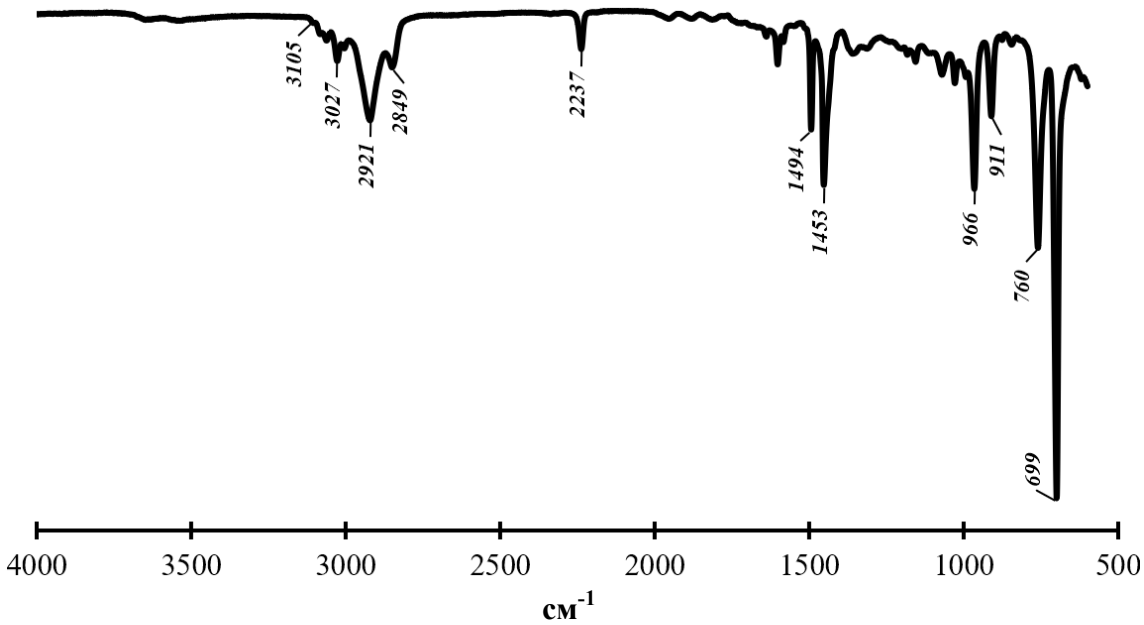


Рис. 1. ИК-спектр порошкообразного АБС
(иллюстрация авторов)
Fig. 1. FTIR spectrum of powdered ABS
(illustration by the authors)

Нитрильные группы в составе АБС обуславливают совместимость с ПВХ ввиду наличия полярных валентных колебаний группы CCl (684 $см^{-1}$ и 609 $см^{-1}$) в немодифицированной ПВХ-композиции (рис. 2, а).

Следует отметить, что данные пики остаются без изменений вне зависимости от концентрации модификатора, а полоса 684 $см^{-1}$ в ПВХ-композициях, модифицированных АБС (рис. 2, б-г), образовала «плечо» при наложении с пиком стирольных групп (760 $см^{-1}$). По мере увеличения концентрации модификатора в ПВХ-композициях наблюдается рост интенсивностей полос пропускания, характерный для АБС: 3027 $см^{-1}$, 2237 $см^{-1}$, 1494 $см^{-1}$, 1453 $см^{-1}$, 966 $см^{-1}$, 911 $см^{-1}$, 760 $см^{-1}$ и 699 $см^{-1}$, что позволяет сделать вывод об отсутствии химического взаимодействия между полимерами ПВХ и АБС в процессе экструдирования.

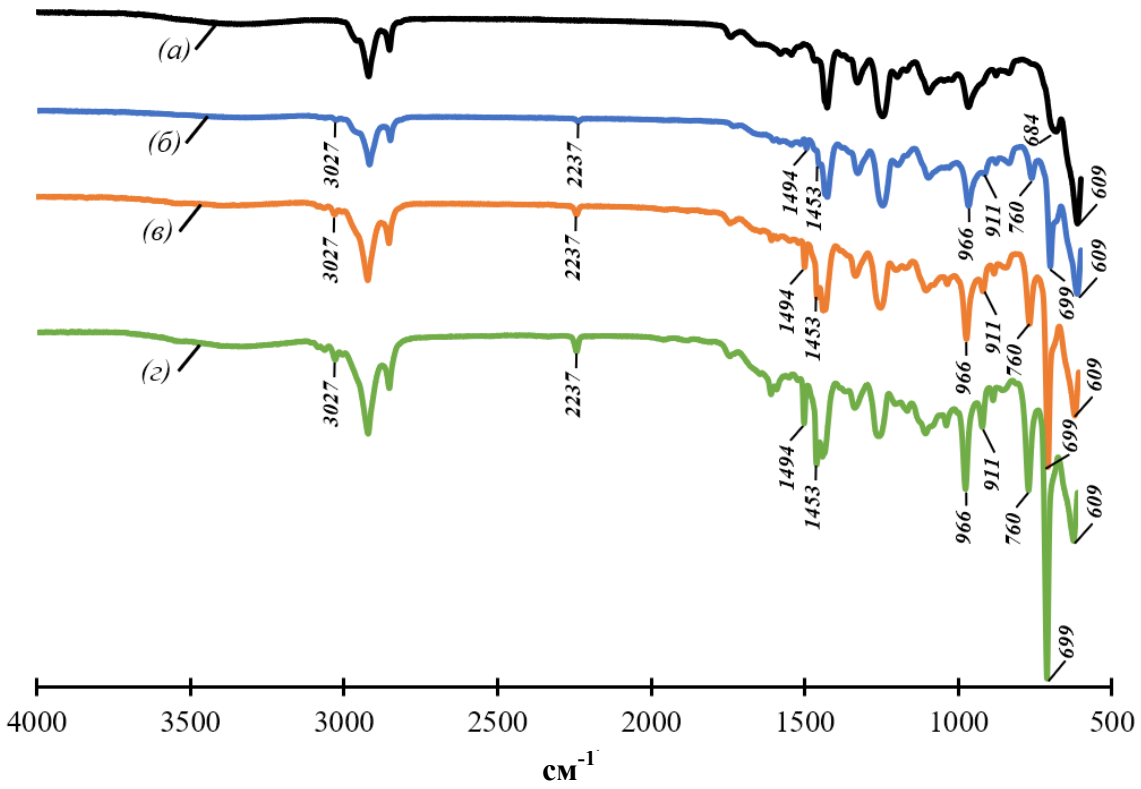


Рис. 2. ИК-спектр смесей полимеров ПВХ/АБС с концентрацией АБС, мас.ч.:
(а) – 0; (б) – 20; (в) – 50; (г) – 100
Fig. 2. FTIR spectrum of PVC/ABS polymer mixtures with ABS concentration, phr:
(a) - 0; (b) - 20; (c) - 50; (d) - 100

С использованием электронной микроскопии при 10000-кратном увеличении была исследована структура смесей полимеров ПВХ/АБС (рис. 2).

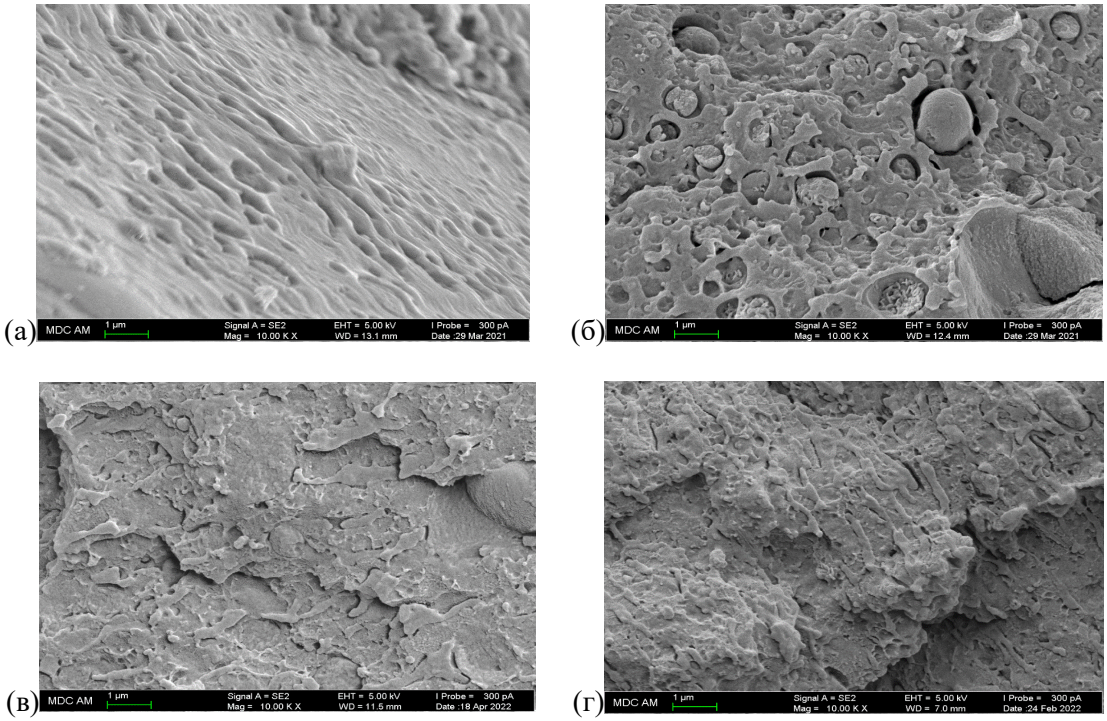


Рис. 3. Электронно-микроскопические снимки смесей полимеров ПВХ/АБС
с концентрацией АБС, мас.ч.: (а) – 0; (б) – 20; (в) – 50; (г) – 100 (иллюстрация авторов)
Fig. 3. Electron-microscopic pictures of PVC/ABS polymer mixtures with ABS concentration, phr:
(a) - 0; (b) - 20; (c) - 50; (d) - 100 (illustration by the authors)

Структура ПВХ-композиции, не содержащей в рецептуре АБС, является микрогетерогенной с наличием включений стабилизаторов (рис. 3, а). При введении 20 мас.ч. АБС поверхность дисперсионной ПВХ-среды имеет структуру с включением дисперсных частиц разных размеров. Полые очертания вокруг включений указывают на слабую межфазную адгезию (рис. 3, б). При наличии 50 мас.ч. АБС поверхность сколов ПВХ-композитов не содержит дисперсных частиц, однако имеют место ярко выраженные границы раздела в дисперсионной среде (рис. 3, в). При содержании 100 мас.ч. АБС выявлена достаточно равномерная непрерывная фаза смеси полимеров, что может быть связано с формированием взаимопроникающей структуры композита (рис. 3, г).

В таблице представлены результаты анализа состава дисперсионной среды. Поскольку дисперсионной средой смесей полимеров является ПВХ, в спектрах был обнаружен хлор, характеризующий содержание ПВХ, количество которого изменялось в зависимости от концентрации АБС. В дисперсионной среде композиций с концентрацией 20 мас.ч. АБС элемент азот не обнаружен, т.к. АБС, в основном, концентрируется во включениях дисперсной фазы. Это подтверждается полученными ранее данными о выделении АБС в виде самостоятельной дисперсной фазы [19], как показано на рис. 2, б. При 50 мас.ч. и 100 мас.ч. АБС в дисперсионной ПВХ-среде отмечено наличие элемента азота (с концентрацией, соответственно, 2,9 и 4,8 вес. %), что является следствием образования непрерывной фазы двух полимеров.

Таблица

Энергодисперсионный анализ дисперсионной среды

Элемент	Концентрация АБС, мас.ч.			
	0	20	50	100
Хлор (Cl), вес. %	16,9	20,2	22,8	17,4
Азот (N), вес. %	0	0	2,9	4,8

4. Заключение

1. Методом ИК-спектроскопии идентифицированы основные полосы пропускания, характерные для структуры тройного порошкообразного сополимера АБС, немодифицированной ПВХ-композиции и смесей полимеров ПВХ/АБС. Установлено отсутствие химического взаимодействия между полимерами ПВХ и АБС.

Электронно-микроскопические исследования композитов ПВХ/АБС показали, что увеличение концентрации АБС приводит к изменению структуры от микрогетерогенной двухфазной (при 20 мас.ч. АБС) до взаимопроникающей (при 100 мас.ч. АБС).

2. Результаты энергодисперсионного анализа показали, что при 100 мас.ч. АБС (то есть при ПВХ:АБС 1:1) соотношение количества элемента хлора к азоту (по весу) в дисперсионной среде более чем в 2 раза меньше, чем при концентрации 50 мас.ч. С учетом атомных масс данных элементов это свидетельствует о том, что при максимальной концентрации АБС получены смеси полимеров ПВХ/АБС с двумя непрерывными взаимопроникающими фазами.

Список литературы / References

1. Visakh P.M., Markovic G., Pasquini D. Recent Developments in Polymer Macro, Micro and Nano Blends. Woodhead Publishing, 2017. 329 c.
2. Низамов Р.К. Полифункциональные наполнители для поливинилхлоридных композиций строительного назначения // Строительные материалы. 2006. № 7. С. 68–70. [Nizamov R.K. Polyfunctional fillers for polyvinyl chloride compositions for construction purposes // Stroitelnyye materialy. 2006. Iss. 7. P. 68–70]
3. Yu J. и др. Thermal degradation of PVC: A review // Waste Management. 2016. Т. 48. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.11.041
4. Лавров Н.А., Белухичев Е.В. Полимерные смеси на основе поливинилхлорида (обзор) // Пластические массы. 2020. № 3–4. С. 55–59. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-3-4-55-59 [Lavrov N.A.. Belukhichev E.V. Polyvinyl chloride-based polymer blends (overview) // Plasticheskiye massy. 2020. Iss. 3–4. P. 55–59. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-3-4-55-59]
5. Применение модификаторов ударопрочности с высоким содержанием каучука в термопластичных составах : пат. 2683075 Рос. Федерация. № 2016144687 ; заявл.

16.05.2018 ; опубл. 26.03.2019, Бюл. № 9. 21 с. [Application of impact modifiers with high rubber content in thermoplastic compositions : patent. 2683075 of the Rus. Federation. № 2016144687 ; decl. 16.05.2018 ; publ. 26.03.2019, Bull. in № 9. 21 p.]
6. Лавров Н.А. и др. Влияние модификаторов ударопрочности на свойства жестких пленок из поливинилхлорида // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2017. № 3. С. 40–42. [Lavrov N.A. i dr. Effect of impact modifiers on the properties of rigid PVC films // Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik. 2017. Iss. 3. P. 40–42]
7. Барсамян Г.Б. Модификаторы для жесткого ПВХ // Пластикс. 2017. Т. 165, № 3. С. 21–23. [Barsamyan G.B. Modifiers for rigid PVC // Plastiks. 2017. Vol. 165, Iss. 3. P. 21–23]
8. Трифонова О.М., Садриева А.Г., Ахметов И.Г. О свойствах и технологии производства АБС-пластиков в ОАО "Нижнекамскнефтехим" // Пластические массы. 2014. № 1–2. С. 6–9. [Trifonova O.M.. Sadriyeva A.G.. Akhmetov I.G. About Properties and Technology of ABS Plastics Production at OAO Nizhnekamskneftekhim // Plasticheskiye massy. 2014. Iss. 1–2. P. 6–9]
9. Benabid F., Zouai F. The acrylonitrile-butadiene-styrene effect as an impact modifier on poly(vinyl chloride) / acrylonitrile-butadiene-styrene (PVC/ABS) blends properties // J. Polym. Sci. Technol. 2021. Т. 1, № 6. С. 36–41.
10. Беспалов, Ю.А. Коноваленко Н.Г. Многокомпонентные системы на основе полимеров. Л.: Химия, 1981. 88 с. [Bespalov. Yu.A. Konovalenko N.G. Polymer-based multicomponent systems. L.: Khimiya, 1981. 88 p.]
11. Кулезнев В.Н. Смеси и сплавы полимеров (конспект лекций). СПб: Научные основы и технологии, 2013. 216 с. [Kuleznev V.N. Polymer mixtures and alloys (lecture notes). SPb: Nauchnyye osnovy i tekhnologii, 2013. 216 p.]
12. Воющий С.С. Аутогезия и адгезия полимеров. М: Ростехиздат, 1964. 244 с. [Voyushchiy S.S. Autogeasy and adhesion of polymers. M: Rostekhizda, 1964. 244 p.]
13. Липатов Ю.С. Межфазные явления в полимерах. Киев: Наукова думка, 1980. 260 с. [Lipatov Yu.S. Interphase phenomena in polymers. Kiyev: Naukova dumka, 1980. 260 p.]
14. Jin D.W. и др. Compatibility enhancement of ABS/PVC blends // J. Appl. Polym. Sci. 1998. Т. 70, № 4. DOI: 10.1002 / (SICI) 1097-4628 (19981024)70:43.3.CO ; 2-C
15. Hosseinpour P.M. и др. Morphological, mechanical, and rheological studies of PVC/ABS blends in the presence of maleic anhydride // J. Vinyl Addit. Technol. 2010. Т. 16, № 2. DOI: 10.1002/vnl.20234
16. Mehdipour M.R., Talebi S., Aghjeh M.K.R. Effect of Unplasticized Poly Vinyl Chloride (UPVC) Molecular Weight and Graft-Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (g-ABS) Content on Compatibility and Izod Impact Strength of UPVC/g-ABS Blends // J. Macromol. Sci. Part B Phys. 2017. Т. 56, № 9. DOI: 10.1080/00222348.2017.1360684
17. Gawade A.R., Lodha A. V., Joshi P.S. PVC/ABS blends: Thermal and morphological studies // J. Macromol. Sci. Part B Phys. 2008. Т. 47, № 1. DOI: 10.1080/00222340701748701
18. Kulshreshtha A.K. и др. Sem fractographic studies on PVC/ABS polyblends // Eur. Polym. J. 1989. Т. 25, № 9. DOI:10.1016/0014-3057(89)90111-0
19. Khuziakhmetova K., Abdrakhmanova L., Nizamov R. Polymer Mixtures Based on Polyvinyl Chloride for the Production of Construction Materials // Lect. Notes Civ. Eng. 2021. Т. 169. С. 14–21. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_2

Информация об авторах

Карина Рустамовна Хузиахметова, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: karina261996@mail.ru

Ляйля Абдулловна Абдрахманова, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: laa@kgasu.ru

Рашит Курбангалиевич Низамов, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: Nizamov@kgasu.ru

Людмила Ильинична Потапова, кандидат химических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: ludmilapo@mail.ru

Information about the authors

Karina R. Khuziakhmetova, post-graduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
Email: karina261996@mail.ru
Lyailya A. Abdrakhmanova, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
Email: laa@kgasu.ru
Rashit K. Nizamov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
Email: Nizamov@kgasu.ru
Ludmila I. Potapova, candidate of chemical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
Email: ludmilapo@mail.ru

УДК: 625.85
DOI: 10.52409/20731523_2022_3_90
EDN: JVCPAL

Материал дорожного покрытия на основе битумно-резинового вяжущего

Д.С. Смирнов[1], Э.М. Ягунд[1], В.Е. Броднева[2], А.Ш. Хасанов[2],
[1]Казанский государственный архитектурно-строительный университет
[2]АО «Татавтодор»
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Актуальная на сегодняшней день проблема - колееобразование на дорожных покрытиях - приводит к снижению срока эксплуатации автомобильной дороги. Для решения этой задачи дорожного строительства одним из приоритетов является повышение физико-механических свойств асфальтобетона и его устойчивости к образованию колеи пластичности. Введение в состав щебеночно-мастичного асфальтобетона стабилизирующих добавок на основе отходов производства позволяет не только регулировать его физико-механические свойства, но и решает проблему утилизации отходов. Цель исследования – изучение влияния диспергированных отходов производств резино-технических изделий на физико-механические свойства битумного вяжущего и щебеночно-мастичного асфальтобетона. Основными задачами являются изучение влияния резиновой крошки на растяжимость, температуру размягчения и хрупкости битумного вяжущего; отработка технологического режима получения асфальтобетона на основе битумно-резинового вяжущего и изучение влияния резиновой крошки на прочность и сдвигоустойчивость щебеночно-мастичного асфальтобетона.
Результаты. Установлено повышение сдвигоустойчивости щебеночно-мастичного асфальтобетона при добавлении отходов резино-технических изделий в битумное вяжущее. Отработана технология приготовления битумо-резиновой композиции.
Выводы. Оптимизация технологии изготовления битумно-резиновой композиции и введение ее в состав щебеночно-мастичного асфальтобетона позволит повысить его физико-механические характеристики, что в перспективе увеличит период эксплуатации асфальтобетонных дорожных покрытий, изготовленных на его основе.

Ключевые слова: щебеночно-мастичный асфальтобетон, битумное вяжущее, резино-техническое изделие, стабилизирующая добавка, температура размягчения, хрупкости и растяжимость битума.

Для цитирования: Д. С. Смирнов, Э.М. Ягунд, В.Е. Броднева, А.Ш. Хасанов Материал дорожного покрытия на основе битумно-резинового вяжущего//Известия КГАСУ, №3(61), с.90-102, DOI10.52409/20731523_2022_3_90, EDN: JVCPAL

Road surface material based on bitumen-rubber binder

D. S. Smirnov[1] , E.M. Yagund[1] , V.E. Brodneva[2], A.Sh. Khasanov[2] ,
[1]Kazan State University of Architecture and Civil Engineering
[1]AO "Tatavtodor"
Kazan, Russian Federation

Abstract. *Problem statement.* The purpose of the project is to consider the possibility of using rubber waste as a modifying additive of petroleum bitumen, to study the effect of waste from the production of rubber and technical products on the physical and mechanical properties of bitumen binders.
Results. Positive results of physical and mechanical properties were established when adding waste rubber products to bituminous binders, the use of a bitumen-rubber composition in the composition of crushed stone-mastic asphalt concrete (SMA) also provides regulatory characteristics
Conclusions. It is assumed that the optimization of the technology of adding bitumen-rubber composition to the composition of the SHMA and its development will increase its physical and mechanical characteristics, which makes it possible in the future to increase the period of operation of asphalt-concrete road surfaces made on its basis.

The Keywords: asphalt concrete, bitumen, strength, rubber-technical product, stabilizing additive, softening temperature, brittleness

For citation: D.S. Smirnov, E.M. Yagund, V.E. Brodneva, A.Sh. Khasanov Pavement material based on bitumen-rubber binder//News KSUAE, №3 (61), p. 90-102, DOI10.52409/20731523_2022_3_90, EDN: JVCPAL

1. Введение

Ежегодно по всему миру наблюдается рост интенсивности дорожного движения, что в значительной степени снижает период эксплуатации дорожных покрытий. Прежде всего, это связано с образованием колеи, что делает движение автотранспорта небезопасным и требует частичного или капитального ремонта покрытия в сравнительно короткие промежутки времени. Повышение устойчивости покрытия к образованию колеи пластичности является приоритетной задачей в дорожном строительстве [1]. Весьма актуальной также является проблема утилизации отходов резино-технической промышленности, применение резиновой композиции в составе щебеночно-мастичного асфальтобетона (ЩМА) способствует решению этого вопроса [2-4].

Для повышения периода эксплуатации автомобильных дорог дорожными организациями чаще применяются щебеночно-мастичные асфальтобетоны, менее склонные к образованию колеи. Данный материал отличается от обычного асфальтобетона повышенным содержанием щебня, что приводит к увеличению содержания свободного битума и, как следствие, необходимости использования недешевых стабилизирующих добавок, которые препятствуют стеканию избыточного количества вяжущего [5-6].

Известно применение резины для модификации нефтяного битума. У резинонаполненных битумных вяжущих благодаря связанным частицам наблюдается более высокая температура размягчения, что, в свою очередь, снижает колееобразование и позволяет расширить температурный диапазон эксплуатации покрытий из ЩМА, также повышается эластичность, что имеет большое преимущество при эксплуатации при отрицательных температурах [12-14].

Цель работы – изучение влияния диспергированных отходов производств резино-технических изделий на физико-механические свойства битумного вяжущего и щебеночно-мастичного асфальтобетона.

Задачи работы:

1. Изучить влияние резиновой крошки на растяжимость, температуру размягчения и хрупкости битумного вяжущего.
2. Отработать технологический режим получения асфальтобетона на основе битумно-резинового вяжущего.
3. Изучить влияние резиновой крошки на прочность и сдвигоустойчивость щебеночно-мастичного асфальтобетона.

2. Материалы и методы

Для исследования битума в качестве испытуемого исходного материала использован битум нефтяной дорожный 70/100 (БНД 70/100) и битум нефтяной дорожный 70/100 с добавлением стабилизирующей добавки - целлюлозной фибры марки Viatop 66 в количестве 0,5% от количества битума и резиновая крошка (отход производства труб высокого давления, выпускаемых АО Камско-Волжское акционерное общество резинотехники «КВАРТ»).

Основными контролируемыми параметрами являлись: температура размягчения, хрупкости и растяжимость при 25°С и 0°С.

Результаты испытаний исходного БНД 70/100 и БНД 70/100 с применением добавки Viatop 66 в количестве - 0,5% приведены в таблице 1. Все показатели исходного битума соответствуют нормативным.

Таблица 1

Результаты испытаний битума

Наименование	Температура размягчения, °С	Температура хрупкости, °С	Растяжимость при 25 °С, см	Растяжимость при 0 °С, см
БНД 70/100	48,00	-18	141,30	4,70
БНД 70/100 + Viatop 66	49,00	-	30,10	4,70

Для получения битумно-резинового вяжущего в металлическую емкость заливали дорожный битум, имеющий марку БНД 70/100, далее вяжущее нагревали и расплавляли до температуры 160°С, вводили добавку в количестве 8%, 12% и 16%. Смеси перемешивали в течение 5 мин, 15 мин и 30 мин. Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты испытаний битума с добавлением резиновой крошки

№ п/п	Время смешивания, мин	Температура размягчения, °С	Температура хрупкости, °С	Растяжимость при 25 °С, см	Растяжимость при 0 °С, см
Резиновая крошка - 8%					
1	5	49,40	-17	14,50	4,80
2	15	49,70	-17	12,20	5,70
3	30	50,60	-16	11,10	4,20
Резиновая крошка - 12%					
1	5	52,30	-15	10,30	4,00
2	15	50,80	-16	10,00	5,20
3	30	49,70	-16	9,60	4,30
Резиновая крошка - 16%					
1	5	52,30	-20	10,80	3,30
2	15	52,90	-19	8,10	4,20
3	30	52,30	-17	8,30	3,50

ИК-спектр резиновой крошки приведен на рисунке 1.

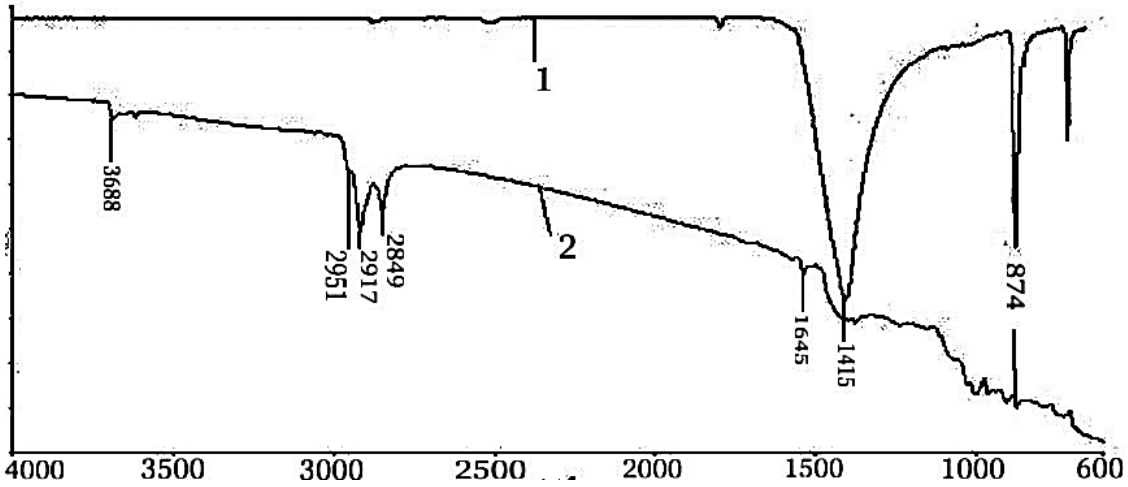


Рис.1. ИК-спектры минерала кальцита (кривая 1) и резиновой крошки (кривая 2) (иллюстрация авторов)
Fig.1. IR spectra of calcite mineral (curve 1) and rubber crumb (curve 2) (illustration by the authors)

В спектре отчетливо проявляются пики 2951, 2917, 2849 $см^{-1}$ (валентные колебания метильных CH_3 и метиленовых CH_2 групп) и 1545 $см^{-1}$ (деформационные колебания метиленовых групп) [15]. Наличие этих групп характерно для любых органических соединений, в том числе для каучуков. Имеются также свободные от Н-связи ОН-группы (пик 3688 $см^{-1}$). Широкий фон рассеяния, который приводит к уменьшению пропускания в правой, низкочастотной части спектра, объясняется наличием технического углерода (сажи), которым обычно наполняют каучуки. Именно он придает образцам черный цвет.

Необходимо также отметить присутствие в образцах резиновой крошки минеральной примеси. Вероятнее всего, этой примесью является минерал кальцит, входящий в состав природного известняка. Спектр кальцита также приведен на рисунок 1 (кривая 1). Химически кальцит является кристаллическим карбонатом кальция $CaCO_3$, и наиболее интенсивной полосой в его спектре является пик 1415 $см^{-1}$ валентных колебаний связей С-О и 874 $см^{-1}$ деформационных колебаний этих связей. Оба этих пика отчетливо проявляются в ИК-спектре крошки.

Первым контролируемым параметром была температура размягчения битума, которая определяется согласно ГОСТ 33142-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения температуры размягчения. Метод «Кольцо и шар» (КиШ), рисунок 2. Сущность испытания в том, что битум, достигая температуры размягчения, начинает перемещаться по вертикальной оси под влиянением стального шарика и данные о температуре размягчения фиксируются при затрагивании контрольного диска.

Для проведения опыта битум должен быть обезвожен, что достигается нагревом до температуры 80°-100°С, затем им заполняют кольца. В течение 20 минут битум остужается, и излишек срезается горячим ножом. Далее кольца устанавливают в приборе и помещают термометр, чтобы его низ был наравне с кольцом. Погружают прибор в емкость с водой при температуре 5+0,5°С и выдерживают 15 минут, затем, установив шарик, начинают нагревать в этой емкости со скоростью 5+0,5° С в минуту. В момент касания шариком пластины отмечают температуру воды.



Рис. 2 Прибор «Кольцо и шар» (иллюстрация авторов)
Fig.2 - The "Ring and Ball" device (illustration by the authors)

Дуктильность битума - максимальная длина растягивания образца без его разрыва при постоянной скорости и температуре. Испытание проводится согласно ГОСТ 11505-75 «Битумы нефтяные. Метод определения растяжимости» (рисунок 3).

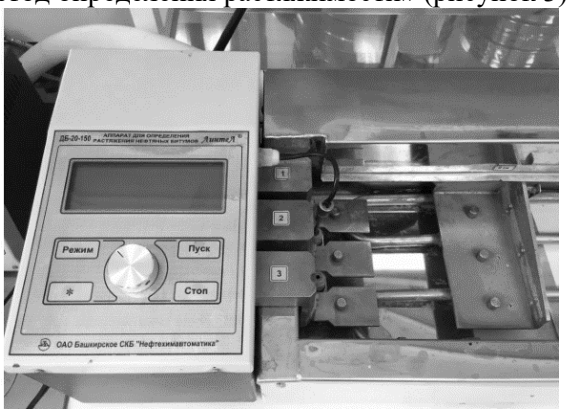


Рис. 3. Дуктилометр (иллюстрация авторов)
Fig.3. Ductilometer (illustration by the authors)

Используют специальную форму «восьмерку», куда заливают битум, предварительно смазав стенки, после остывания на воздухе излишек срезают горячим ножом. Форму выдерживают в водяной бане с температурой 25+0,1° С 60 минут, по истечение времени образцы перемещают в дуктилометр с водой той же температуры. «Восьмерку» закрепляют и снимают стенки формы, по салазкам происходит растяжение битума со скоростью 5 см в 1 мин, определяют длину нити при разрыве (в см).

Температурой хрупкости считается температура, когда на битуме начинают образовываться трещины при охлаждении и периодическом изгибе.

Испытание проводится согласно ГОСТ 11507-78 «Битумы нефтяные. Метод определения температуры хрупкости по Фраасу» (рисунок 4) и заключается в равномерном охлаждении и попеременном изгибе образца, далее фиксируется температура, при которой начинают появляться трещины. Битум доводят до подвижного состояния при температуре нагревания не более чем на 100°С больше температуры размягчения. Образец на пластине устанавливают в пробирку с хлористым кальцием. Термометр должен быть расположен уровне середины стальной пластинки, температура должна быть не менее чем на 15 °С выше минимально допустимой для данной марки битума. Порциями вводят охлаждающий реагент для понижения температуры.

Изгибать пластинку с помощью вращения рукоятки со скорость 1об/с начинают после падения температуры на 3 °С, скорость падения около (1,0+ 0,1) °С в 1 мин. Этот

цикл должен заканчиваться за (22 ± 2) с, отмечают температуру в момент появления первой трещины.

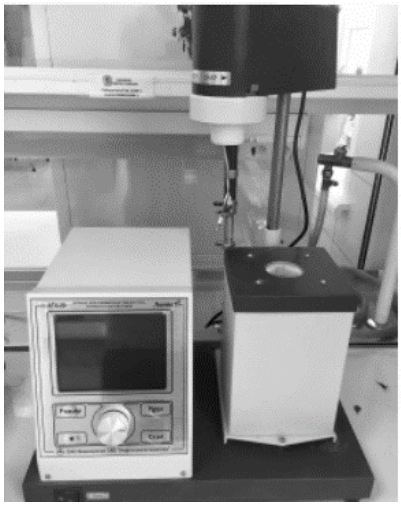


Рис. 4. Аппарат для определения температуры хрупкости битума (иллюстрация авторов)
Fig.4 - Apparatus for determining the temperature of bitumen brittleness (illustration by the authors)

В качестве материала покрытия автомобильной дороги исследовался щебеночно-мастичный асфальтобетон с наибольшим размером фракций крупного заполнителя 10 мм (ЩМА-10) [12]. В качестве стабилизирующих добавок применялись целлюлозная фибра марки Viatop 66, диспергированная резиновая крошка в виде отхода производства труб высокого давления, а также сочетание указанных добавок друг с другом [13-14].

Основными контролируемыми параметрами являлись: прочность на сжатие при температуре 0 и 50°С и характеристики сдвигоустойчивости ЩМА-10 в виде параметров коэффициента внутреннего трения и показателя сцепления при сдвиге. Испытания проводились согласно ГОСТ 12801-98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний».

Образцы ЩМА-10 изготовлены на основе щебня «Абзаковский» фр. 5/10 – 69%, дробленого песка «Уралдоломит» – 23%, добавки Viatop66 в количестве – 0,5%, добавки Амдор10 – 0,3%, активированного минерального порошка – 8% и битума БНД 70/700 – 6,5%.

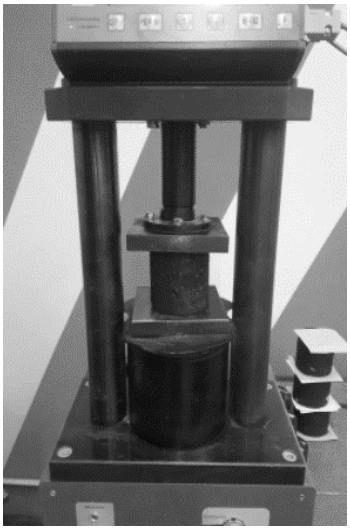
Для испытаний асфальтобетонной смеси при приготовлении в лабораторных условиях используется специальная асфальтосмесительная установка с обогревом.

Изготовление образцов осуществлялось в следующей последовательности. Инертные материалы предварительно высушивали, помещали в лабораторную асфальтосмесительную установку и нагревали. В последнюю очередь добавлялось нагретое вяжущее. Перемешивание компонентов производили в течение 3-6 минут при температуре 165ºС. Формовка и уплотнение будущих образцов для испытаний производили на прессе под давлением 40 МПа.

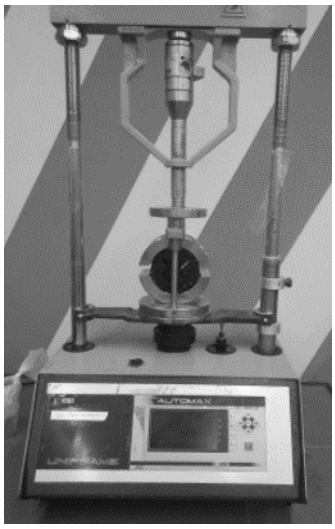
Прочность при сжатии определяли в соответствии с ГОСТ 12801-84 Смеси асфальтобетонные дорожные и аэродромные, дегтебетонные дорожные, асфальтобетон и дегтебетон. Испытания проводили в следующей последовательности:

- выдерживание в течение 1 ч. в воде при той температуре: (50±2)°С и (0±2)°С;
- взвешивание на воздухе и воде;
- установка образцов в центр нижней плиты пресса и опускание верхней плиты на 1,5-2 мм выше форм;
- нагружение образца при скорости движения пресса (3,0±0,3) мм/мин;
- фиксирование данных о разрушающей нагрузке.

Параметр сдвигоустойчивости - значение максимальных нагрузок и соответствующих им предельных деформаций для стандартных образцов-цилиндров при двух разных напряженно-деформированных состояниях (рис.5.)



1)



2)

Рис. 5. Испытания образцов на сдвигоустойчивость: 1 - при одноосном сжатии; 2 - при сжатии по схеме Маршалла
(иллюстрация авторов)
Fig.5 . Tests of samples for shear stability: 1 - with uniaxial compression; 2 - with compression according to the Marshall scheme
(illustration by the authors)

При испытаниях по данному методу сдвигоустойчивость при относительно высоких положительных температурах характеризуется по двум расчётным показателям: коэффициенту внутреннего трения и показателю сцепления при сдвиге.

Перед испытанием не менее 6 образцов выдерживают в воде в течение часа при температуре $(50\pm2)℃$. Три образца испытывают по схеме 1 и ещё три образца по схеме поочередно, устанавливая образцы по центру плиты пресса. Нагружение образцов в обоих схемах осуществляется при скорости (50 ± 1) мм/мин. При этом определяют максимальные разрушающие нагрузки и соответствующие им предельный деформации образцов в мм (l_i) (точность измерения индикатора перемещений должна быть не менее 0,01 мм).

При испытании по схеме №1 для каждого образца рассчитывают предел прочности при одноосном сжатии в МПа, (R_{ci}):

$$R_{ci} = (P_i/P) \times 10 \quad (1)$$

где: P – площадь поперечного сечения образца асфальтобетона.

Также рассчитывают работу, затраченную на разрушение для каждого образца в Дж (A_i) при испытаниях по схемам №1 и №2, по формуле:

$$A_i = (P_i \times l_i)/2 \quad (2)$$

где: P_i- разрушающая нагрузка, кН;

l_i- предельная деформация, мм.

Определяют среднее значение предела прочности при сжатии в МПА (R_c) и среднеарифметическое значение работы разрушения в Дж (A_c, A_m). В заключение на основе полученных данных рассчитывают коэффициент вязкости асфальтобетона в МП, ($tg\vartheta$):

$$tg\vartheta = (3 \times (\bar{A}_m - \bar{A}_c))/(3\bar{A}_m - 2\bar{A}_c) \quad (3)$$

где: $\bar{A}_m$ *и* $\bar{A}_c$ – среднее значение работы, затраченной на разрушение образцов асфальтобетона при испытании соответственно по схеме №2 (схема Маршалла) и по схеме №1 (при одноосном сжатии) в Дж.

Коэффициент сцепления при сдвиге асфальтобетона в Мпа, ($C_л$), определяется по формуле:

$$C_л = ⅙ \times (3 - 2tg\vartheta) \times R_c \quad (4)$$

где: R_c- среднее значение предела прочности при одноосном сжатии асфальтобетона, Мпа.

3. Результаты и обсуждение

На графике (рисунок 6) показано изменение температуры размягчения битума в зависимости от количества добавки и времени перемешивания ее с битумом.

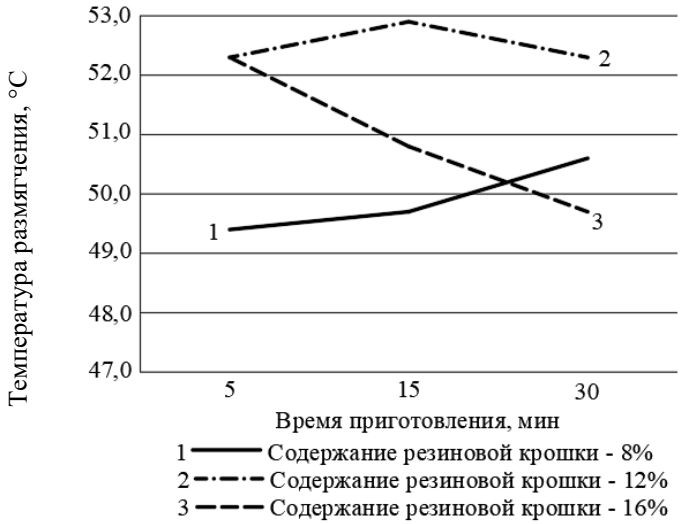


Рис. 6. График изменения температуры размягчения (иллюстрация авторов)
Fig. 6. Graph of the softening temperature change (illustration by the authors)

Из результатов, приведенных на графике видно, что максимум температуры размягчения по методу КиШ был достигнут у образца с 16% добавки, что было принято за оптимальное значение по данному параметру. Значения температуры размягчения каждого из образцов выше, чем у исходного битума, что обуславливается увеличением количества асфальтенов в битумной композиции.

В зависимости от содержания резиновой крошки в битуме при разном времени приготовления у образцов с содержанием добавки 16% и временем перемешивания 5 и 15 минут показатель температуры хрупкости лучше, чем у исходного битума (рисунок 7).

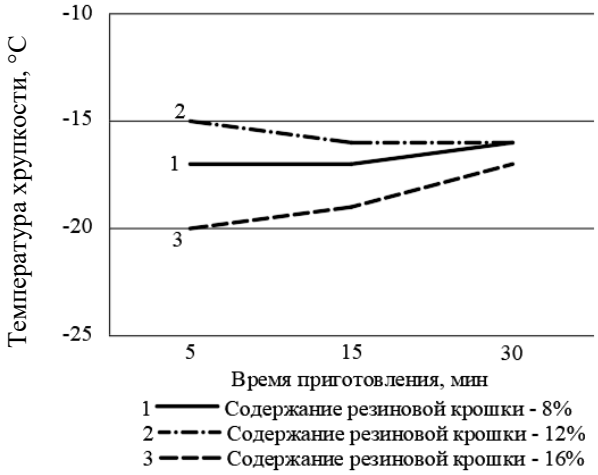


Рис. 7. График изменения температуры хрупкости битума (иллюстрация авторов)
Fig.7. Graph of changes in the temperature of bitumen brittleness (illustration by the authors)

Согласно результатам, представленным на графике (рисунок 8), растяжимость резко ухудшается, что может объясняться постепенным уплотнением структуры битума с добавкой резиновой крошки. Максимум среди образцов с битумно-резиновой композицией достигается при содержании резиновой крошки 8% и времени перемешивания 5 мин.

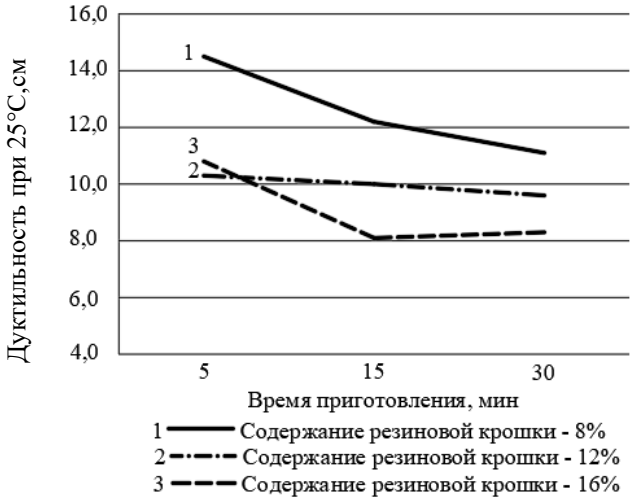


Рис.8. График растяжимости при 25 °С в зависимости от содержания резиновой крошки при разном времени приготовления (иллюстрация авторов)
Fig.8. The graph of extensibility at 25 ° C, depending on the content of rubber crumbs at different cooking times (illustration by the authors)

Анализ графика растяжимости (рисунок 9) при 0 °С в зависимости от содержания резиновой крошки при разном времени приготовления позволяет сделать вывод о том, что показатели при содержании добавки 8% и времени перемешивания 5 и 15 мин. имеют наибольшие значения, которые также превышают и растяжимость исходного материала при 0 °С. Наименьшие значения достигаются при содержании битумно-резиновой композиции 16% и времени перемешивания 5 и 30 мин.

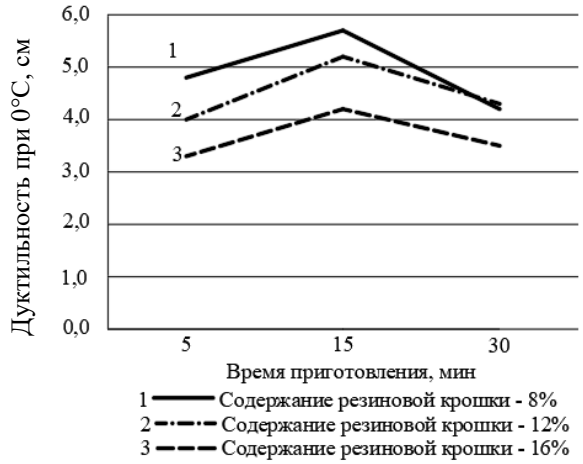


Рис. 9. График растяжимости при 0 °С в зависимости от содержания резиновой крошки при разном времени приготовления (иллюстрация авторов)
Fig.9. The graph of extensibility at 0 ° C, depending on the content of rubber crumbs at different cooking times (illustration by the authors)

Результаты испытаний ЩМА-10 (исходный состав) на сдвигоустойчивость представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты испытаний состава №1

Образец №	Диаметр образца, мм	Высота образца, мм	Разрушающая нагрузка, кН	Разрушающая нагрузка, МПа	Работа, затраченная на разрушение, Дж
1	71,4	71,4	6,07	1,516	6,747
2	71,4	71,4	6,07	1,516	6,501
3	71,4	71,4	6,15	1,536	7,595
4	71,4	71,4	17,02	-	38,61
5	71,4	71,4	18,89	-	40,87
6	71,4	71,4	17,50	-	38,18

Прочность при 0°С: R_0 =7 ,84 МПа.
Прочность при 50°С: R_{50}=0,97 МПа.
Работа при сжатии по Маршаллу: A_m = 39 Дж.
Работа при одноосевом сжатии: A_c = 6,9 Дж.
Прочность при одноосном сжатии: R_c = 1,5 МПа.
Коэффициент внутреннего трения ЩМА-10: $tg\varphi$ = 0,93 МПа.
Сцепление при сдвиге: $C_л$= 0,29 МПа.

Результаты испытаний того же состава ЩМА-10 при добавлении резиновой крошки в количестве 10% от массы битума приведены в таблице 4. Перемешивание сырья производилось в течение 3 минут при температуре 160ºС, точное время и температуру, как правило, устанавливают опытным путем. Далее было произведено уплотнение смеси.

Таблица 4

Результаты испытаний состава №2

Образец №	Диаметр образца, мм	Высота образца, мм	Разрушающая нагрузка, кН	Разрушающая нагрузка, МПа	Работа, затраченная на разрушение, Дж
1	71,4	71,4	2,63	0,657	4,405
2	71,4	71,4	2,69	0,672	5,03
3	71,4	71,4	2,72	0,680	5,140
4	71,4	71,4	8,65	-	34,17
5	71,4	71,4	9,2	-	26,52
6	71,4	71,4	11,78	-	39,32

Прочность при 0°С: R_0 =6,35 Мпа.
Прочность при 50°С: R_{50} =0,584 Мпа.
Работа при сжатии по Маршаллу: A_m =33 Дж.
Работа при одноосевом сжатии: A_c = 4,86 Дж.
Прочность при одноосном сжатии: R_c = 0,67 МПа.
Коэффициент внутреннего трения ЩМА-10: $tg\varphi$ = 0,94 МПа.
Сцепление при сдвиге: $C_л$= 0,33 МПа.

Результаты испытаний и сравнение их с показателями исходного материала говорят о том, что прочность при сжатии при 20°С у ЩМА-10 содержащего 10% резиновой крошки ниже, чем у исходного материала, но остается выше требуемых нормативных значений. А вот прочность при 50°С ниже уже нормативного значения. Однако при этом наблюдается повышение сдвигоустойчивости

Результаты испытаний состава ЩМА-10 при добавлении резиновой крошки взамен добавки Viatop 66 в количестве 0,5% и уменьшенном количестве битума – 5,3 % приведены в таблице 5.

Таблица 5

Результаты испытаний состава №3

Образец №	Диаметр образца, мм	Высота образца, мм	Разрушающая нагрузка, кН	Разрушающая нагрузка, МПа	Работа, затраченная на разрушение, Дж
1	71,4	71,4	3,51	0,889	7,17
2	71,4	71,4	3,12	0,779	6,29
3	71,4	71,4	3,35	0,837	6,76
4	71,4	71,4	10,58	-	33,56
5	71,4	71,4	11,28	-	38,13
6	71,4	71,4	11,68	-	38,05

Прочность при 0°С: R_0 =5,92 МПа.

Прочность при 50°С: R_0=0,52 МПа.

Работа при сжатии по Маршаллу: A_m = 37 Дж.

Работа при одноосевом сжатии: A_c = 6,7 Дж.

Прочность при одноосном сжатии: R_c = 0,84 МПа.

Коэффициент внутреннего трения ЩМА-10: $tg\varphi$ = 0,93 МПа.

Сцепление при сдвиге: $C_л$= 0,16 МПа.

Результаты испытаний позволяют сделать вывод о том, что при добавлении резиновой крошки вместо стабилизирующей добавки Viatop 66 характеристики остаются в пределах нормативных показателей, кроме показателя по сдвигоустойчивости при 50°С.

4. Заключение

Выполненное исследование позволило сделать следующие выводы:

1. Изучено влияние резиновой крошки на растяжимость, температуру размягчения и хрупкости битумного вяжущего. В образцах битумно-резинового вяжущего наблюдались улучшения показателей температуры размягчения и хрупкости при добавлении в битум 16% резиновой крошки.
2. Отработан технологический режим получения асфальтобетона на основе битумно-резинового вяжущего. Установлено оптимальное время перемешивания битумно-резиновой композиции, которое составило 15 минут, при содержании резиновой крошки 16 %.
3. Установлено, что при добавлении резиновой крошки в ЩМА-10 повышаются показатели сдвигоустойчивости, однако прочность при сжатии ЩМА-10 при 50°С снижается. Это требует дополнительных исследований.

Список литературы/ References

1. Алексеенко В.В., Житов Р.Г., Кижняев В.Н., Митюгин А.В. Новые технологии получения битумно-резиновых композиционных вяжущих для дорожного строительства // Наука и техника в дорожной отрасли. 2010. №1. С. 25–27. [Alekseenko V.V., Zhitov R.G., Kizhnyaev V.N., Mityugin A.V. New technologies for obtaining bitumen-rubber composite binders for road construction // Science and technology in the road industry. 2010. No. 1. pp. 25-27]
2. Вабищевич К.Ю, Коновалов Н.П., Коновалов П.Н, Хозеев Е.О. Использование отходов резины для модификации вяжущего в асфальтобетоне // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2020. № 2. С. 18-25. [Vabishchevich K.Yu, Konovalov N.P., Konovalov P.N., Khozyaev E.O. The use of rubber waste for the modification of binder in asphalt concrete // Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2020. No. 2. pp. 18-25]
3. Лукьянова М.А., Вахьянов Е.М. Обоснование рационального состава битумных вяжущих модифицированных резиновой крошкой // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015,.№ 4 (110). С. 143-147. [Lukyanova M.A., Vasyanov E.M. Substantiation of the rational composition of bitumen

binders modified with rubber crumb // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2015,.No. 4 (110). pp. 143-147]
4. Баранов И. А. Оценка эффективности стабилизирующих добавок для улучшения структуры и свойств щебеночно-мастичного асфальтобетона. Орел: 2015. 176 с. [Baranov I. A. Evaluation of the effectiveness of stabilizing additives to improve the structure and properties of crushed-mastic asphalt concrete. Eagle: 2015. 176 p.]
5. Awanti S. S. Laboratory Evaluation of SMA Mixes Prepared with SBS Modified and Neat Bitumen Procedia // Social and Behavioral Sciences, 2017. Vol. 104. P. 59–68. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.11.098.
6. Kiran Kumar N. L., Ravitheja A. Characteristics of stone matrix asphalt by using natural fibers as additives // Materials today, 2019. Vol. 19. P. 397–402. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.624.
7. Александров Д. Ю. Перспективы применения комплексно-модифицированного асфальтобетона в дорожном строительстве // Наука и техника. 2017. В 4. С. 315–323. DOI: 30627272/ 2227-1031.2017.4.315-323 [Alexandrov D. Yu. Prospects for the use of complex-modified asphalt concrete in road construction // Science and Technology. 2017. In 4. pp. 315-323. DOI: 30627272/ 2227-1031.2017.4.315-323]
8. Быстров Н.В. Нормирование свойств модифицированных битумов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 5. С. 198–203[Bystrov N.V. Normalization of properties of modified bitumen // Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2018. Vol. 20. No. 5. pp. 198-203]
9. Худоконенко А. А. Анализ требований отечественных и зарубежных нормативных документов к составам асфальтобетонных смесей: тезисы докладов Международной научно-практической конференции / Ростов-на-Дону, 2015. С. 28–29. [Khudokonenko A. A. Analysis of the requirements of domestic and foreign regulatory documents for asphalt concrete mixtures: abstracts of the International Scientific and Practical Conference / Rostov-on-Don, 2015. pp. 28-29.]
10. Desseaux S., Santos S., Geiger T., Tingaut P., Zimmermann T. N., Part M. D., Poulikakos L. Improved mechanical properties of bitumen modified with acetylated cellulose fibers // Composites Part B – Engineering, 2018. P.139–144. DOI: 10.1016/2017.12.010.
11. Р. И. Сибгатуллина, А. И. Абдуллин, Е. А. Емельянычева. Изучение свойств нефтяных дорожных битумов, модифицированных резиновой крошкой // Вестник технологического университета. 2017. № 20. С. 76–79. [R. I. Sibgatullina, A. I. Abdullin, E. A. Yemelyanycheva. Study of the properties of petroleum road bitumen modified with rubber crumb // Bulletin of the Technological University. 2017. No. 20. pp. 76-79]
12. Sadeghian M., Latifi Namin M., Goli H. Evaluation of the fatigue failure and recovery of SMA mixtures with cellulose fiber and with SBS modified // Construction and Building Materials, 2019. P. 818–826. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.308.
13. Аюпов Д. А., Макаров Д. Б. Теоретические аспекты расслаиваемости битумполимерных вяжущих // Вестник Казанского технологического университета. 2016. № 23. С. 50–53. [Ayupov D. A., Makarov D. B. Theoretical aspects of delamination of bituminous polymer binders // Bulletin of Kazan Technological University. 2016. No. 23. pp. 50-53]
14. Печеный Б.Г., Данильян Е.А., Галдина В.Д. Влияние режимов приготовления асфальтобетонных смесей на свойства асфальтобетонов.// Строительные материалы. 2009. №11. С. 36-39. [Pechenyi B.G., Danilyan E.A., Galdina V.D. The influence of the modes of preparation of asphalt concrete mixtures on the properties of asphalt concrete.// Building materials. 2009. No.11. pp. 36-39]
15. Купцов А.Х., Жижин Г.Н. Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров. М.: Физматлит, 2001. 308 с. [Kuptsov A.H., Zhizhin G.N. Fourier-KR and Fourier-IR spectra of polymers. M.:Fizmatlit, 2001. 308 p.]
16. Bulanov P., Vdovin E., Stroganov V., Mavliev L., Juravlev I. Complex Modification of Bituminous Binders by Linear Styrene-Butadiene-Styrene Copolymer and Sulfur //

Proceedings of STCCE 2022. STCCE 2022. Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. Vol. 291. P. 204-213. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-14623-7_35.
17. Ayupov D., Makarov D., Kazakulov R. Nanomodified polymer-bitumen binders // Proceedings of STCCE 2021. STCCE 2021. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 169. P. 325–333. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_35.

Информация об авторах.

Денис Сергеевич Смирнов, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.
E-mail: denis27111974@yandex.ru
Эдуард Михайлович Ягунд, кандидат химических наук, доцент Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.
E-mail: emj@rambler.ru
Валерия Евгеньевна Броднева, лаборант, АО «Татавтодор», г. Казань, Российская Федерация.
E-mail: valeria011278@gmail.com
Алмаз Шамилевич Хасанов, начальник лаборатории Мамадышского филиала, АО «Татавтодор», г. Казань, Российская Федерация.
Hasanov.Almaz@mmd.tatavtodor.ru

Information about the authors

Denis S. Smirnov, candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russian Federation.
E-mail: denis27111974@yandex.ru
Eduard M. Yagund, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russian Federation.
E-mail: emj@rambler.ru
Valeriya E. Brodneva, laboratory assistant, JSC "Tatavtodor", Kazan, Russian Federation.
E-mail: valeria011278@gmail.com
Almaz Sh. Khasanov, Head of the Laboratory of the Mamadysh branch, JSC Tatavtodor, Kazan, Russian Federation.
Hasanov.Almaz@mmd.tatavtodor.ru

УДК: 691.161
DOI: 10.52409/20731523_2022_3_103
EDN: HOAOTX

Влияние целлюлозных стабилизирующих добавок на физико-механические характеристики битума

Е.А. Вдовин[1], П.Е. Буланов[1], И.В. Журавлев[2]
[1]Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
[2]ООО «Волгадорстрой», г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Целью работы является исследование гранулированных стабилизирующих добавок с различным содержанием целлюлозы на физико-механические характеристики битума. Актуальность исследования связана с тенденцией роста интенсивности движения автомобильного транспорта в Российской Федерации. Как следствие, происходит увеличение требований по межремонтным срокам автомобильных дорог, по экологической безопасности. Соответствию данным требованиям способствует применение более стойких к растущим нагрузкам щебеночно-мастичных асфальтобетонов со стабилизирующими добавками.
Результаты. Модифицирование битума стабилизирующей добавкой (с содержанием волокон целлюлозы и воска – 60 % и 40 % соответственно) в количестве 2 % и 4 % повышает следующие физико-механические характеристики: температура размягчения по кольцу и шару на 7,36 % и 26,18 %; глубина проникания иглы при 25 °С – 6,25 % и 12,5 %; растяжимость при 0 °С – 105,24 % и 74,33 % соответственно. Модифицирование битума стабилизирующей добавкой (с содержанием волокон целлюлозы и воска – 20 % и 80 % соответственно) в количестве 2 % и 4 % повышает температуру размягчения по кольцу и шару на 22,29 % и 59,10 %; снижает глубину проникания иглы при 25 °С – 10,34 % и 5,49 %; увеличивает растяжимость при 0 °С – 110,35 % и 9,27 % соответственно.
Выводы. Выявлены закономерности влияния стабилизирующих добавок с различным содержанием волокон целлюлозы и воска на физико-технические характеристики битума.

Ключевые слова: битум, щебеночно-мастичный асфальтобетон, стабилизирующая добавка, целлюлоза, физико-механические характеристики.

Для цитирования: Е.А. Вдовин, П.Е. Буланов, И.В. Журавлев. Влияние целлюлозных стабилизирующих добавок на физико-механические характеристики битума //Известия КГАСУ 2022 №3, с.103-109,
DOI: 10.52409/20731523_2022_3_103, EDN: HOAOTX

The effect of cellulose stabilizing additives on the physical and mechanical characteristics of bitumen

E.A. Vdovin[1], P.E. Bulanov[1], I.V. Zhuravlyov[2]
[1] Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
[2] Limited liability company «Volgadorstroi»

Abstract. The aim of the work is to study granular stabilizing additives with different cellulose content on the physical and mechanical characteristics of bitumen. The relevance of the study is related to the trend of increasing traffic intensity of motor transport in the Russian Federation. As a result, there is an increase in requirements for the inter-repair terms of highways, for environmental safety. Compliance with these requirements is facilitated by the use of crushed

stone-mastic asphalt concrete with stabilizing additives that are more resistant to increasing loads.
Results. Modification of bitumen with a stabilizing additive (containing cellulose and wax fibers – 60% and 40%, respectively) in an amount of 2% and 4% increases the following physical and mechanical characteristics: softening temperature along the ring and ball by 7.36% and 26.18%; needle penetration depth at 25 °C – 6.25% and 12.5%; extensibility at 0 °C – 105.24% and 74.33%, respectively. Modification of bitumen with a stabilizing additive (containing cellulose and wax fibers – 20% and 80%, respectively) in an amount of 2% and 4% increases the softening temperature along the ring and ball by 22.29% and 59.10 %; reduces the penetration depth of the needle at 25 °C – 10.34% and 5.49%; increases the extensibility at 0 °C – 110.35% and 9.27%, respectively.
Conclusions. The regularities of the influence of stabilizing additives with different content of cellulose and wax fibers on the physical and technical characteristics of bitumen are revealed.

Keywords: bitumen, crushed-mastic asphalt concrete, stabilizing additive, cellulose, physical and mechanical characteristics.

For citation: E.A. Vdovin, P.E. Bulanov, I.V. Zhuravlev. The effect of cellulose stabilizing additives on the physical and mechanical characteristics of bitumen//News KSUAE 2022 №3 (61), p. 103-109, DOI: 10.52409/20731523_2022_3_103, EDN: HOAOTX

1. Введение

На сегодняшний день в большинстве стран наблюдается непрерывный рост транспортного потока и увеличение грузоподъемности автомобилей, которое приводит к преждевременному разрушению дорожного покрытия и уменьшения срока эксплуатации дорог. Эти и многие другие причины заставляют обратить внимание на повышение качества автомобильных дорог [1, 2]. Существует много современных технических решений, одним из которых является технология укладки верхнего слоя дорожного полотна на основе щебеночно-мастичного асфальтобетона (ЩМА) [3].

ЩМА представляет собой рационально подобранную смесь, состоящую из минеральной части (щебня, дробленого песка и минерального порошка), битумного вяжущего и стабилизирующих или иных добавок, способных удерживать битумное вяжущее при технологических температурах, взятых в определенных соотношениях и перемешанных в нагретом состоянии [4].

ЩМА характеризуется повышенным содержанием щебня, минерального порошка и битумного вяжущего, обладающего следующими положительными свойствами: повышенной износостойкостью к шипованной резине автомобилей, шероховатой поверхностью и устойчивостью к пластическому колееобразованию из-за высокого содержания щебня; водонепроницаемостью и трещиностойкостью за счет увеличенного количества битумного вяжущего и пр. [5].

Однако, из-за повышенного температурного режима укладки и количества битума в ЩМА, наблюдается стекание вяжущего в смеси на всех технологических этапах устройства покрытия автомобильной дороги. Для борьбы со стеканием используют различные стабилизирующие добавки [6], которые благодаря своим свойствам, адсорбируют неструктурированный битум и позволяют ему удерживаться на поверхности зерен щебня [7]. Использование в ЩМА стабилизирующих добавок на основе натуральных целлюлозных волокон позволяют не только увеличить толщину битумного слоя на поверхности минеральной части дорожного покрытия, но и связать попадающую в массив покрытия влагу внутри капилляров целлюлозы, не давая воде замерзнуть и расшириться [8].

Первоначально в качестве стабилизатора использовались так называемые свободные целлюлозные волокна, нарезанные и «распушенные» специальным образом. Однако после перехода от единичного производства ЩМА к массовому все чаще и чаще стали проявляться определенные дефекты смеси, в частности, сегрегация и появление битумных пятен различной величины (иногда обширной площади) на вновь уложенной дорожной поверхности непосредственно в процессе уплотнения. После дополнительных

исследований было обнаружено, что, несмотря на стабилизирующий эффект, свободные волокна обладают серьезными недостатками в виде: повышенной гигроскопичности; затруднения распределения свободных волокон в смесителе; склонности к комкованию; высокой вероятности обгорания используемых стабилизирующих добавок [9].

Дальнейшим эволюционным развитием семейства стабилизаторов стало появление гранулированных добавок. Гранулированные добавки представляют собой волокна, спрессованные в гранулы с их обработкой модифицирующими составами или без нее [10]. Волокнистая добавка должна быть однородной, без примесей, устойчивой к нагреву до температуры 220 °С и обладать влажностью не более 8 % по массе [11]. Следует различать три вида гранулированных добавок: гранулы, состоящие из чистой целлюлозы, гранулы с добавлением парафинов (воск, стеарин) для уменьшения гигроскопичности и гранулы, в которых каждое целлюлозное волокно имеет битумную пленку [12, 13].

Гранулированный тип является наиболее доступным на рынке, и как следствие, более популярным [14, 15].

В связи с этим, особую актуальность приобретают работы, направленные на изучение влияния гранулированных стабилизирующих добавок с различным содержанием целлюлозы на физико-механические характеристики битумов.

Целью работы является исследование гранулированных стабилизирующих добавок с различным содержанием целлюлозы на физико-механические характеристики битума.

Задачи:

1) Исследование влияния температуры размягчения, глубины пенетрации и растяжимости битума, модифицированного стабилизирующей добавкой с содержанием целлюлозы 60 %.
2) Исследование влияния температуры размягчения, глубины пенетрации и растяжимости битума, модифицированного стабилизирующей добавкой с содержанием целлюлозы 20 %.

2. Материалы и методы

При модификации битума использовались стабилизирующие добавки на основе целлюлозы СД-1 (содержание волокон целлюлозы и воска – 60 % и 40 % соответственно), СД-2 (содержание волокон целлюлозы и воска – 20 % и 80 % соответственно). Насыпная плотность Стабилизирующие добавки имели следующие характеристики: насыпная плотность – 550 кг/м^3; содержание мелкой фракции (менее 2 мм) – 6,4 %; содержание в гранулах целлюлозных волокон – 59,7 %; влажность – 7,6 %; термостойкость при температуре 220 ^{o}С по изменению массы при прогреве – 6,6 %.

Для проведения испытаний стабилизирующие добавки СД-1 и СД-2 были измельчены и вводились в нагретый до 110 ^{o}С битум. Вводимая дозировка добавок составляла 2 % и 4 % от массы битума.

В качестве вяжущего использован битум БНД 70/100 АО «Новокуйбышевский НПЗ» по ГОСТ 33133-2014. Исследованы следующие физико-механические характеристики битума, модифицированного целлюлозными стабилизирующими добавками СД-1 и СД-2: температура размягчения по кольцу и шару по ГОСТ 33142-2014, глубина проникания иглы при 25 ^{o}С по ГОСТ 33136-2014 и растяжимость при 0 ^{o}С по ГОСТ 33138-2014.

Температура размягчения по кольцу и шару определялся на приборе КиШ-20 Линтел (Россия), глубина проникания иглы при 25 ^{o}С на пенетрометре UTEST (Германия), растяжимость при 0 ^{o}С на дуктилометре Controls (Италия).

3. Результаты и обсуждения

Исследования исходного битума показали следующие физико-механические характеристики: глубина проникания иглы при 25 ^{o}С – 96 мм; температура размягчения по кольцу и шару – 48,9 ^{o}С; растяжимость при 0 ^{o}С – 3,7 см.

В результате испытаний битума, модифицированного стабилизирующей добавкой СД-1 (содержание волокон целлюлозы и воска – 60 % и 40 % соответственно) с содержанием целлюлозы в количестве 2 % и 4 %, установлено, что повышаются следующие физико-механические характеристики: температура размягчения по кольцу и

шару на 7,36 % и 26,18 %; глубина проникания иглы при 25 °С – 6,25 % и 12,5 %; растяжимость при 0 °С – 105,24 % и 74,33 % соответственно.

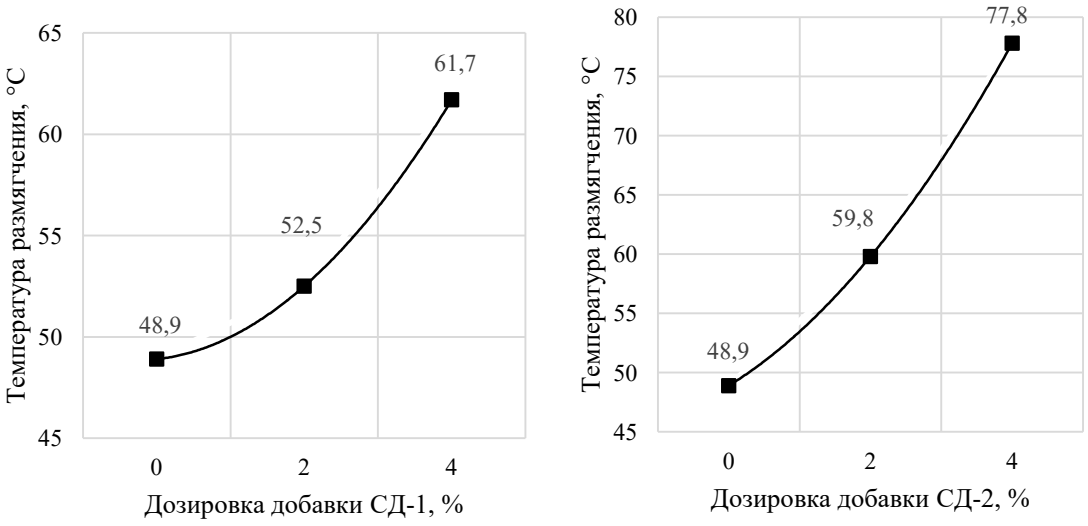


Рис.1 Влияние стабилизирующих добавок СД-1 и СД-2 на температуру размягчения битума.
Fig.1 The effect of stabilizing additives SD-1 and SD-2 on the softening temperature of bitumen.

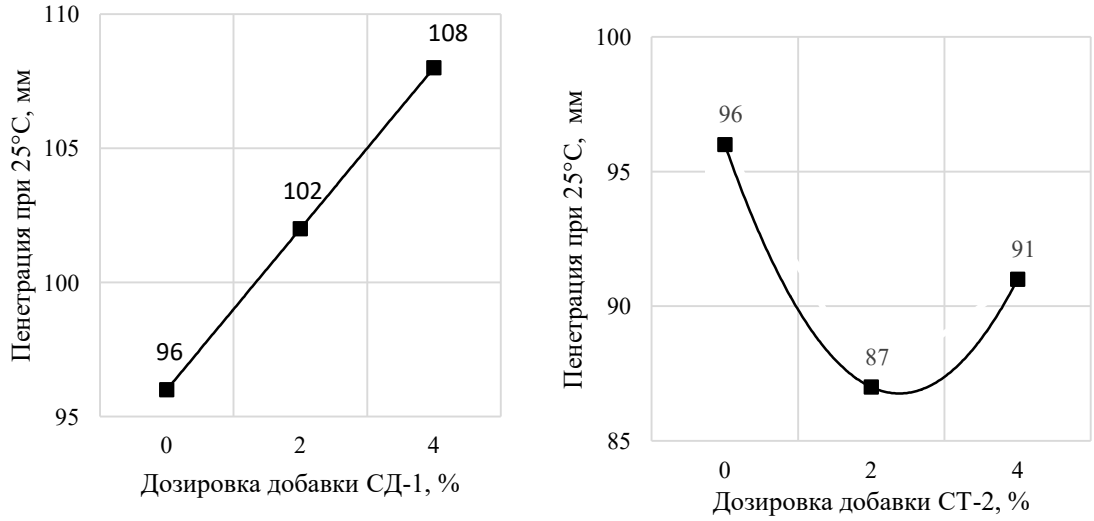


Рис.2 Влияние стабилизирующих добавок СД-1 и СД-2 на пенетрацию битума при 25°С.
Fig.2 Effect of stabilizing additives SD-1 and SD-2 on bitumen penetration at 25 °C.

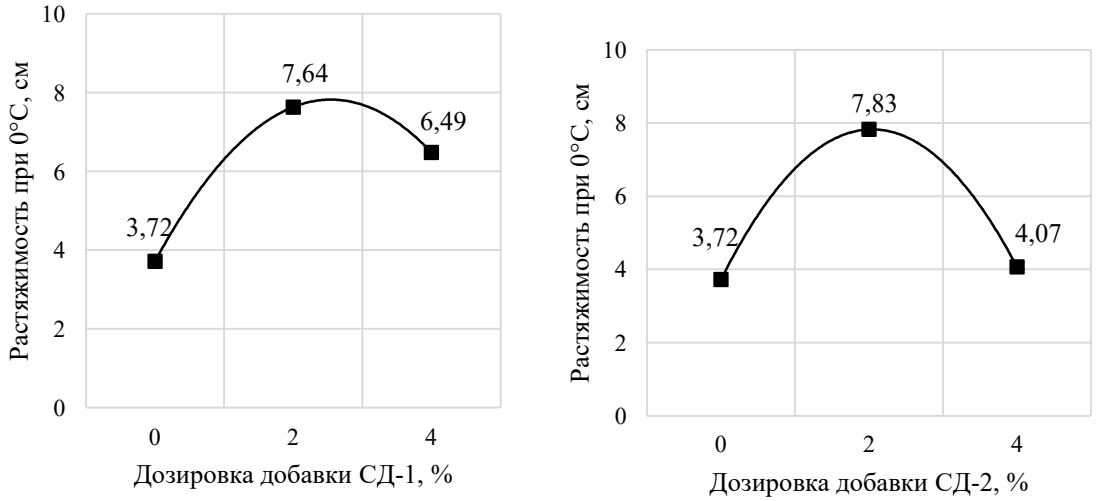


Рис.3 Влияние стабилизирующих добавок СД-1 и СД-2 на растяжимость битума при 0°С.
Fig.3 The effect of stabilizing additives SD-1 and SD-2 on the extensibility of bitumen at 0 °C

В результате испытаний битума, модифицированного стабилизирующей добавкой СД-2 (содержание волокон целлюлозы и воска – 20 % и 80 % соответственно) в количестве 2 % и 4 %, установлено, что повышается температура размягчения по кольцу и шару на 22,29 % и 59,10 %; снижается глубина проникания иглы при 25 °С – 10,34 % и 5,49 %; увеличивается растяжимость при 0 °С – 110,35 % и 9,27 % соответственно.

В исследовании [16], установлено, что при введении целлюлозных стабилизирующих добавок и увеличении их количества в битуме происходит прямо пропорциональное возрастание температуры размягчения, при этом, чем меньше диаметр волокон, тем больше влияние, что согласуется с данными исследованиями.

Таким образом, можно сказать, что добавки улучшают свойства битумов, расширяя интервал пластичности, и тем самым повышают долговечность [17].

В результате проведённых исследований образцов битума со стабилизирующими добавками различной природы установлено, что все представленные добавки обладают структурирующим действием. Добавки, содержащие в составе целлюлозу, существенно не меняют свойства вяжущего, а наличие у образцов связующего компонента ПАВ, напротив, влияет на тиксотропные свойства битума. Эти добавки повышают твёрдость и увеличивают температуру размягчения вяжущего, что в свою очередь свидетельствует об улучшении эксплуатационных характеристик битума и возможность эксплуатации в широком диапазоне температур [18].

4. Заключение

1. Выявлены закономерности влияния стабилизирующих добавок с различным содержанием волокон целлюлозы и воска на физико-технические характеристики битума.
2. Установлено, что модифицирование битума стабилизирующей добавкой (с содержанием волокон целлюлозы и воска – 60 % и 40 % соответственно) в количестве 2 % и 4 % повышает следующие физико-механические характеристики: температура размягчения по кольцу и шару на 7,36 % и 26,18 %; глубина проникания иглы при 25 °С – 6,25 % и 12,5 %; растяжимость при 0 °С – 105,24 % и 74,33 % соответственно.
3. Установлено, что модифицирование битума стабилизирующей добавкой (с содержанием волокон целлюлозы и воска – 20 % и 80 % соответственно) в количестве 2 % и 4 % повышает температуру размягчения по кольцу и шару на 22,29 % и 59,10 %; снижает глубину проникания иглы при 25 °С – 10,34 % и 5,49 %; увеличивает растяжимость при 0 °С – 110,35 % и 9,27 % соответственно.

Список литературы / References

1. Bulanov P., Vdovin E., Stroganov V., Mavliev L., Juravlev I. Complex Modification of Bituminous Binders by Linear Styrene-Butadiene-Styrene Copolymer and Sulfur // Proceedings of STCCE 2022. STCCE 2022. Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. Vol. 291. P. 204-213. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-14623-7_35.
2. Ayupov D., Makarov D., Kazakulov R. Nanomodified polymer-bitumen binders // Proceedings of STCCE 2021. STCCE 2021. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 169. P. 325–333. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_35.
3. Галимуллин И. Н., Башкирцева Н. Ю., Лебедев Н. А. Влияние стабилизирующей добавки из травяной целлюлозы на адгезию дорожного битума // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18. Вып. 3. С. 96-97.
4. Углова Е. В., Ширяев Н. И., Поздняков Н. О. Сравнительный анализ эксплуатационных свойств щебеночно-мастичных и дренирующих асфальтобетонных смесей для слоев износа // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2019. Вып. 1. С. 9–15. DOI: 10.12737/article_5c5061fd688293.78594078.
5. Мевлидинов З. А., Левкович Т. И., Билько А. Е. Обеспечение сдвигоустойчивости асфальтобетонных смесей в покрытиях автомобильных дорог // Интернет-журнал Транспортные сооружения. 2018. Т. 5. Вып. 3. С. 1–14. DOI: 10.15862/06SATS318.
6. Devulapalli L., Kothandaraman S., Sarang G. Evaluation of rejuvenator's effectiveness on the reclaimed asphalt pavement incorporated stone matrix asphalt mixtures // Construction and Building Materials. 2019. Iss. 273. P. 909-919. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.126.
7. Alinezhad M., Sahaf A. Investigation of the fatigue characteristics of warm stone matrix asphalt (WSMA) containing electric arc furnace (EAF) steel slag as coarse aggregate and Sasobit as warm mix additive // Case Studies in Construction Materials. 2019. Iss. 11, P. 211-265. DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00265.
8. Afonso M. L., Dinis-Almeid M., Fael C. S. Study of the porous asphalt performance with cellulosic fibres // Construction and Building Materials. 2017. Iss. 135. P. 104-111. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.624.
9. Галимуллин И. Н., Башкирцева Н. Ю., Лебедев Н. А., Нугманов О. К. Исследование способа получения стабилизирующей добавки для дорожного строительства // Вестник Технологического университета. 2014. Т. 17. Вып. 8. С. 276-279.
10. Cao W., Li J., Marti-Rossell T., Zhang X. Experimental study on the ignition characteristics of cellulose, hemicellulose, lignin and their mixtures // Journal of the Energy Institute. 2019. Iss. 92. P. 1303-1312. DOI: 10.1016/j.joei.2018.10.004.
11. Ядыкина В. В., Гридчин А. М., Траутваин А. И., Юрьев П. С. Влияние стабилизирующих добавок из отходов целлюлозно-бумажной промышленности на свойства щебеночно-мастичного асфальтобетона // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2013. Вып. 6. С. 7-11.
12. Ильина Т.Н., Севостьянов М.В., Шкарпеткин Е.А. Конструктивно-технологическое совершенствование агрегатов для гранулирования порошкообразных материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. Вып. 2. С. 100-102.
13. Ядыкина В. В., Гридчин А. М. Водо- и морозостойкость щебеночно-мастичного асфальтобетона, приготовленного на битуме, модифицированном сэвиленом // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2022. Вып. 2. С. 102-113
14. Sangiorgi C., Tataranni P., Simeone A., Vignali V., Lantieri C., Dondi G. Stone mastic asphalt (SMA) with crumb rubber according to a new dry-hybrid technology: A laboratory and trial field evaluation // Construction and Building Materials. 2019. Iss. 182. P. 200-209. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.128.
15. Nuorivaara T., Sema-Guerrero R. Unlocking the potential of sustainable chemicals in mineral processing: Improving sphalerite flotation using amphiphilic cellulose and frother mixtures // Journal of Cleaner Production. 2020. Iss. 261. P. 65-68. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121143.

16. Landi D., Marconi M., Bocci E., Germani M. Comparative life cycle assessment of standard, cellulose-reinforced and end of life tires fiber-reinforced hot mix asphalt mixtures // Journal of Cleaner Production. 2020. Iss. 261. P. 35-39. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119295.
17. Ястремский Д. А., Абайдуллина Т. Н., Зимакова Г. А. Исследование влияния стабилизирующих добавок на свойства битума в ЩМА // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2018. Вып. 4. С. 63–70.
18. Галимуллин И. Н., Башкирцева Н. Ю., Лебедев Н. А., Нугманов О. К. Оценка влияния стабилизирующих добавок на технические свойства битума // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2015. Вып. 7. С. 40-44.

Информация об авторах.

Вдовин Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
E-mail: vdovin007@mail.ru
Буланов Павел Ефимович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
E-mail: f_lays@mail.ru
Журавлев Игорь Вячеславович, инженер производственно-технического отдела ООО «Волгадорстрой», г. Казань, Российская Федерация
E-mail: igor.zhuravlyov.1998@gmail.com

Information about the authors.

Vdovin Evgeny Anatolyevich, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
E-mail: vdovin007@mail.ru
Bulanov Pavel Efimovich, candidate of technical sciences, senior lecturer, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
E-mail: f_lays@mail.ru
Zhuravlev Igor Vyacheslavovich, engineer of the production and technical department of Volgadorstroy LLC, Kazan, Russian Federation
E-mail: igor.zhuravlyov.1998@gmail.com

УДК: 533.69.048
DOI: 10.52409/20731523_2022_3_110
EDN: HIACOU

Определение коэффициентов сил, действующих на прямоугольную призму в плоскопараллельном потоке методом дискретных вихрей

А.В. Гумеров [1]
[1]Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Задача расчета ветровых воздействий на навесные фасадные системы остается актуальной и по сей день. При выборе креплений таких фасадов необходимо правильно рассчитывать ветровые нагрузки. Цель исследования – получение расчетных интегральных и распределенных аэродинамических характеристик для различных прямоугольных цилиндров методом дискретных вихрей. Для ее достижения было необходимо выполнить следующие задачи: на основе алгоритма метода дискретных вихрей разработать алгоритм моделирования обтекания прямоугольного цилиндра, реализация разработанного алгоритма в виде расчетной программы и проведение численных исследований по определению аэродинамических характеристик прямоугольных цилиндров.
Рассматривается задача двумерного нестационарного отрывного обтекания прямоугольной призмы несжимаемой средой. Расчеты были проведены для различных прямоугольных сечений при различных шагах интегрирования и числа присоединенных вихрей на контуре обтекаемого прямоугольника. Показано, что варьированием этих параметров можно получить аэродинамические характеристики, близкие к экспериментальным.
Результаты. Получены зависимости коэффициентов аэродинамических сил для различных прямоугольников от времени. Показано распределение коэффициента давления по поверхности прямоугольника соответствующее максимальной подъемной силе. Выполнено сравнение полученных расчетных зависимостей коэффициентов сил и числа Струхаля для различных прямоугольников с имеющимися экспериментальными данными. Даны рекомендации по подбору шага интегрирования и по количеству присоединенных вихрей на контуре прямоугольника.
Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в возможности оценки элементов конструкции прямоугольного сечения на прочность и усталость с применением рассчитанных коэффициентов сил. Вычисленное распределение коэффициента давления по поверхности прямоугольного контура, можно использовать для определения ветровых нагрузок на фасадные панели многоэтажных жилых домов.

Ключевые слова: метод дискретных вихрей, присоединенные и сводные вихри, контрольные точки, прямоугольная призма, число Струхаля, комплексный потенциал течения.

Для цитирования: А.В. Гумеров. Определение коэффициентов сил, действующих на прямоугольную призму в плоскопараллельном потоке методом дискретных вихрей // Известия КГАСУ 2022 №3(61) с.110-118, DOI: 10.52409/20731523_2022_3_110
EDN: HIACOU

Determination of the coefficients of forces acting on a rectangular prism in a two-dimensional flow by the method of discrete vortices

Anvar V. Gumerov[1]
[1]Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federatoin

Abstract: In this paper, the calculation method of discrete vortices determines the aerodynamic coefficients of the section of a rectangular high-rise building in plan. The problem of two-dimensional unsteady separation flow around a rectangular cylinder by an incompressible medium is considered. Calculations were carried out for various rectangular sections at different integration steps and the number of attached vortices on the contour of a streamlined rectangle. It is shown that by varying these parameters, it is possible to obtain aerodynamic characteristics close to experimental data.
Results. Time dependences of coefficients of aerodynamic forces for various rectangles are obtained. The distribution of the pressure coefficient over the surface of the rectangle at the maximum lifting force is given. We compared the obtained calculated dependences of the force coefficients and the Strouhal number for various rectangles with the available experimental data. Recommendations are given on the selection of the integration step and on the number of placement of attached vortices on the contour of the rectangle.
Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry consists in the possibility of evaluating the structural elements of rectangular cross-section for strength and fatigue, using the calculated force coefficients. The calculation model makes it possible to determine the distribution of the pressure coefficient for finding wind loads on the façade panels of multi-storey residential buildings.

Keywords: method of discrete vortices, bound and free vortices, control points, rectangular prism, the Strouhal number, flow complex potential.

For citation: A.V. Gumerov, Determination of the coefficients of forces acting on a rectangular prism in a two-dimensional flow by the method of discrete vortices // News KGASU 2022 №3 (61), p. 110-118, DOI: 10.52409/20731523_2022_3_110, EDN: HIACOU

1. Введение

В последние годы интенсивно идет строительство высотных зданий, которые облицовываются вентилируемыми фасадами из композитных панелей. При выборе креплений таких фасадов необходимо правильно рассчитывать ветровые нагрузки. Известно, что одни участки фасада могут испытывать максимальное ветровое давление, а другие разрежение. По инженерной методике расчета с использованием норм СП «Нагрузки и воздействия» можно получить нагрузки для обтекания типовых конфигурации сечения здания..

Методом дискретных вихрей можно моделировать отрывные обтекания различных тел и тем самым определять их аэродинамические характеристики. Картина течения строится путем слежения за свободными вихрями, движущимися с потоком. Такой подход численного решения дифференциальных уравнений механики жидкости и газа, называемый лагранжевым или бессеточным, достаточно экономичен и вполне может дать неплохие результаты на начальном этапе определения аэродинамических характеристик исследуемого профиля [1-4].

О применении метода дискретных вихрей различными исследователями посвящена обзорная статья Сарпкайя Т. [5]. В многочисленных трудах Белоцерковского С.М. описывается численный метод дискретных вихрей для различных задач обтекания. Развитие и применение метода дискретных вихрей отражено в последних работах [6-9].

В работах [10-12] исследуется течение около прямоугольной призмы методом дискретных вихрей и делается сравнение с экспериментальными данными. Сарпкайя в

работе [12] моделирует несколько прямоугольных профилей при углах атаки $\alpha = 1°, 10°$. Приводятся изменения коэффициента лобового сопротивления и подъемной силы от безразмерного времени. Автор замечает, что вихри оказываются на ~ 50% более интенсивными, нежели в реальных потоках при аналогичных условиях. Расхождение между величинами замеренных и расчетных безразмерных сил обусловлено главным образом различиями в механизмах потерь завихренности. Также отмечено, что модель дискретных вихрей не свободна от недостатков и нуждается в некоторой корректировке под результаты экспериментов на основе привлечения подходящего механизма диссипации. Сарпкайя зарождающиеся вихри располагает на некоторых расстояниях от четырех углов прямоугольника, их интенсивности определяет как половину квадрата скорости в ближайших контрольных точках помноженную на шаг по времени.

В работах [13, 14] используется метод конформного отображения внешности круга на внешность эллипса и прямоугольника. В статье [13] Nagano приводит зависимости коэффициентов сил от безразмерного времени для различных сечений. Делается сравнение осредненных значений коэффициентов лобового сопротивления, подъемной силы и числа Струхаля с известными экспериментальными работами. В расчетах используются вихри, имеющие экспоненциальное ядро для устранения сингулярности индуцированной скорости. Интенсивности свободных вихрей определяются как в работе [12]. В статье отмечается важность правильного выбора шага интегрирования для получения корректных результатов.

В работе Белоцерковского С.М. [15] рассматривается нестационарное обтекание квадрата, приведены изменение во времени коэффициентов лобового сопротивления и подъемной силы квадрата при различных расстояниях от экрана, также представлено распределение среднего по времени коэффициента давления по поверхности квадрата и ромба. Отмечается удовлетворительное согласование с известными экспериментальными данными.

Целью настоящего исследования является получение расчетных интегральных и распределенных аэродинамических характеристик для различных прямоугольных цилиндров методом дискретных вихрей.

Для достижения этой цели было необходимо выполнить следующие задачи:

- на основе алгоритма метода дискретных вихрей разработать алгоритм моделирования нестационарного отрывного обтекания прямоугольного цилиндра;
- реализовать разработанный алгоритм в виде расчетной программы;
- провести численные исследования по определению аэродинамических характеристик прямоугольных цилиндров;
- разработать рекомендации по выбору входных параметров влияющих на аэродинамические характеристики: шаг интегрирования и количество присоединенных вихрей на контуре прямоугольника.

2. Материалы и методы

В данной работе предлагается расчетным методом дискретных вихрей определять интегральные и распределенные аэродинамические характеристики, действующие на высотные здания прямоугольного сечения. Рассматривается задача двумерного нестационарного отрывного обтекания прямоугольной призмы несжимаемой средой.

Пусть прямоугольник шириной b (рис. 1) и высотой h обтекается идеальной несжимаемой средой, имеющей на бесконечности скорость V_∞ под углом атаки α. Требуется определить методом дискретных вихрей коэффициенты аэродинамических сил c_y, c_x и распределение коэффициента давления по поверхности прямоугольника. Будем полагать, что прямоугольник – это контур горизонтального поперечного сечения высотного здания.

На контуре прямоугольника через равные промежутки Δl расположим K дискретных вихрей z_j (рис. 1) с интенсивностями Γ_j. Посередине между дискретными вихрями разместим контрольные точки z_i. Далее аналогично методике описанной в [15], составляем систему уравнений AX = B.

Массив A состоит из нормальных скоростей в контрольных точках от присоединенных вихрей:

$$A = (a_{ij}) = -\cos(\varphi_{ij} - \psi_i)/r_{ij} \tag{1}$$

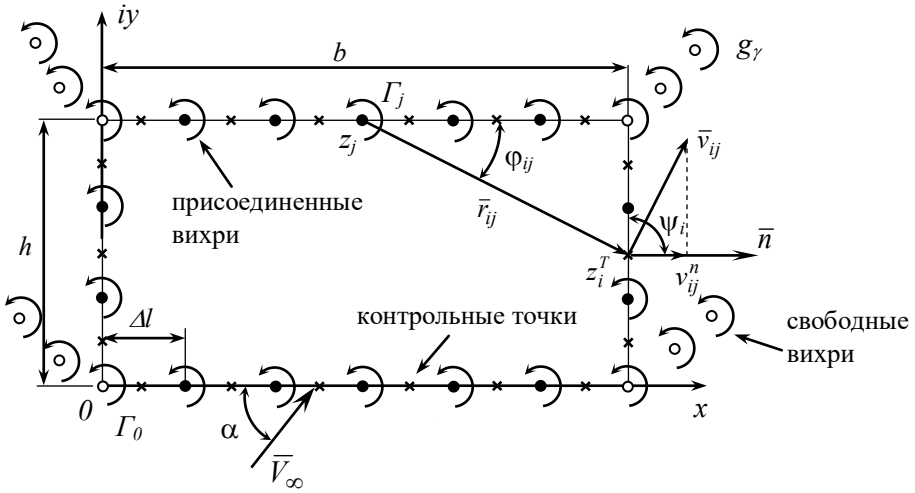


Рис. 1. Расчетная схема обтекания прямоугольника (иллюстрация автора)
Fig. 1. Calculation scheme for flow around a rectangular (illustration by the authors)

По умолчанию положительное направление вращения всех вихрей принимаем направленным против хода часовой стрелки.

Матрица ***B*** состоит из нормальных скоростей в контрольных точка от свободных вихрей g_γ и набегающего потока V_∞:

$$B = (b_i) = 2\pi V_\infty \cdot \sin(\alpha - \psi_i) + \sum_{\gamma=4}^{M} \frac{\cos(\varphi_{i\gamma} - \psi_i) \cdot g_\gamma}{r_{i\gamma}} \tag{2}$$

Из условия равенства суммарной скорости в контрольной точки нулю, находим интенсивности присоединенных вихрей Γ_j. Чтобы система имела единственное решение, необходимо добавить к системе AX = B условие равенства нулю суммарной интенсивности:

$$\sum_{j=0}^{K-1} \Gamma_j + \sum_{\gamma=4}^{M} g_\gamma = 0\,. \tag{3}$$

Расширенная система решается с введением регуляризующей переменной [15] методом Гаусса. Условие Чапыгина-Жуковского автоматически выполняется, так как в каждый момент времени с кромок срываются вихри с найденными интенсивностями.
Каждый свободных вихрь движется согласно уравнению:

$$z_\gamma^{t+\Delta t} = z_\gamma^t + v_\gamma \cdot \Delta t\,, \tag{4}$$

где Δt – шаг интегрирования по времени, v_γ – скорость свободного вихря, определяется из комплексного потенциала течения $F(z)$:

$$F(z) = -\sum_{j=0}^{K-1} \frac{i\Gamma_j}{2\pi} \ln(z - z_j) - \sum_{\gamma=4}^{M} \frac{ig_\gamma}{2\pi} \ln(z - z_\gamma) + V_\infty z e^{-i\alpha}\,, \tag{5}$$

$$v_\gamma = \left(\frac{d\bar{F}}{dz}\right)_{z=z_\gamma} = \frac{i}{2\pi}\left[\sum_{j=0}^{K-1} \frac{\Gamma_j}{\bar{z}_\gamma - \bar{z}_j} + \sum_{\gamma=4}^{M} \frac{g_\gamma}{\bar{z}_\gamma - \bar{z}_j}\right] + V_\infty e^{i\alpha}\,. \tag{6}$$

Несимметричность вводилась смещением оторвавшихся вихрей с левой стороны прямоугольника вниз по потоку в малом промежутке времени $3.5 \le t' \le 4$ по зависимости, приведенной в [16].

Действующие силы на присоединенные вихри можно найти двумя способами. Первый способ более простой по теореме об изменении импульса силы [12,16]:

$$X + iY = i\rho \frac{d}{dt} \sum_{j=1}^{K-1} \Gamma_j \cdot z_j = i\rho \left[\sum_{j=1}^{K-1} \dot{\Gamma}_j \cdot z_j + \right. \tag{7}$$

$$\left. \frac{g_0 \cdot z_0}{\Delta t} + \frac{g_1 \cdot z_1}{\Delta t} + \frac{g_2 \cdot z_2}{\Delta t} + \frac{g_3 \cdot z_3}{\Delta t} \right] - i\rho \sum_{j=1}^{K-1} \Gamma_j \cdot \dot{z}_j \,.$$

Коэффициенты нормальной и поперечной силы определяются из соотношения:

$$c_x + ic_y = \frac{2(X + iY)}{\rho V_\infty^2 b} \,. \tag{8}$$

Второй способ нахождения действующих сил – интегрирование коэффициента давления. Коэффициент давления в контрольной точке находится по известной формуле Коши-Лагранжа:

$$c_{p_i} = 1 - \frac{(v_i^T)^2}{V_\infty^2} - \frac{2}{V_\infty^2} \cdot \frac{\partial \varphi_i^T}{\partial t} \,. \tag{9}$$

Для данной формулы скорость в контрольной точке определяется аналогично (2) но с учетом дополнительной скорости:

$$v_i^T = \frac{i}{2\pi} \left[\sum_{j=0}^{K-1} \frac{\Gamma_j}{\bar{z}_i^T - \bar{z}_j} + \sum_{\gamma=4}^{M} \frac{g_\gamma}{\bar{z}_i^T - \bar{z}_j} \right] + V_\infty e^{i\alpha} + v_{don.} \,, \tag{10}$$

где $v_{don.} = \pm \frac{1}{4\Delta l} \left(\Gamma_j + \Gamma_{j-1} \right)$ – дополнительная скорость от двух соседних присоединенных вихрей в контрольной точке. Знак плюс, если направление скорости совпадает с положительным направлением оси. Изменение потенциала скорости в контрольной точке (9) за время Δt:

$$\frac{\partial \varphi_i^T}{\partial t} = \mathrm{Re}\left(\frac{\partial F(z_i^T)}{\partial t} \right) = \frac{1}{2\pi} \sum_{j=0}^{K-1} \dot{\Gamma}_j \arg(z_i^T - z_j) + \mathrm{Re} \sum_{\gamma=4}^{M} \frac{i g_\gamma}{2\pi} \cdot \frac{\dot{z}_\gamma}{z_i^T - z_j} \tag{11}$$

В расчетах свободные вихри, близко подходящие к присоединенным вихрям, могут проникнуть внутрь контура. Такое поведение вызывает всплески в рассчитываемых коэффициентах сил. В программе вводилось условие равенства нулю нормальной составляющей скорости вихря, если он приближался ближе *Δl/2*. Если же произошло проникновение вихрей, то их интенсивности обнулялись. Вышеприведенный алгоритм расчета был реализован в виде программы на языке C++ Builder. Для контроля правильности проводимых расчетов в составленной программе предусматривалась визуализация положения дискретных вихрей и поля скоростей в каждый момент времени.

3. Результаты и обсуждения

Как показали настоящие расчеты основными параметрами, влияющими на коэффициенты нормальной силы c_y, поперечной силы c_x и частоту срыва вихрей *Sh* (число Струхаля) с прямоугольника являются:

- шаг интегрирования по времени Δt,
- интервал между присоединенными вихрями на контуре прямоугольника Δl.

Шаг интегрирования Δt сильно влияет на движения вихрей около обтекаемого профиля. Большой шаг интегрирования приводит быстрому уносу вихрей по течению. Вихри не задерживаются, не накапливаются, тем самым уменьшается возможность проникновения в контур прямоугольника, и самое главное, приводит к уменьшению частоты срыва вихрей, что приближает расчетные значения к экспериментальным данным по числу Струхаля. За тот же промежуток времени от начала расчета, при выборе меньшего шага Δt, приводит к формированию большего числа вихрей в следе, и к увеличению числа их отрывов от тела, то есть к возрастанию числа Струхаля. Вихри не уносятся из-за погрешности расчета по потоку, а группируются на подветренной стороне

профиля. Это приводит к увеличению суммарной интенсивности, что сказывается на росте коэффициентов сил.

Увеличение числа разбивки прямоугольника уменьшает пробитие вихрями контура прямоугольника. При этом интенсивности вихрей на кромках уменьшаются, поскольку интенсивности присоединенных вихрей распределяются более равномерно, что приводит к некоторому занижению аэродинамических коэффициентов. Это легко исправляется уменьшением шага интегрирования, что в свою очередь приводит к росту *Sh*.

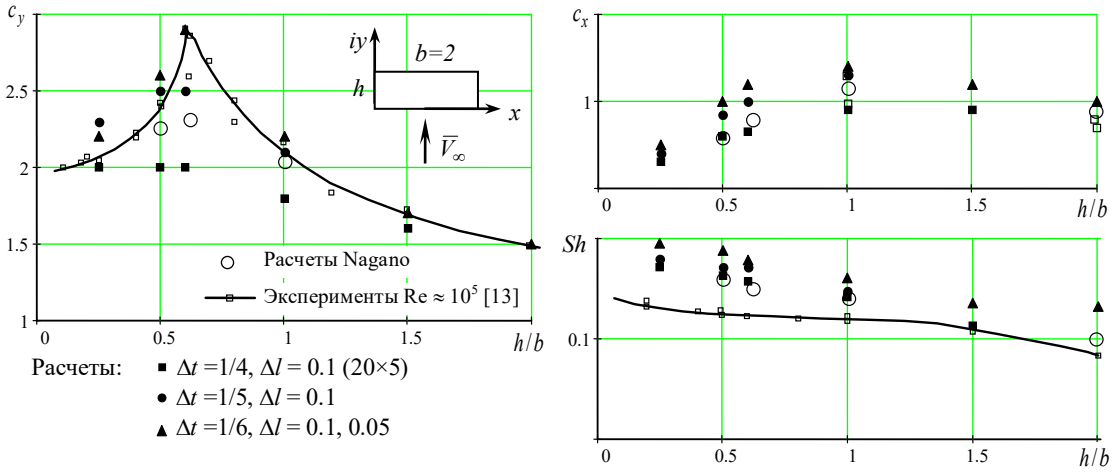


Рис. 2. Зависимости коэффициентов нормальной силы c_y, поперечной силы c_x и числа Струхаля *Sh* для различных прямоугольников (α = 90°)

Fig. 2. Dependences of coefficients of normal force c_y, transverse force c_x and Strouhal number *Sh* for various rectangles (α = 90°)

Были проведены расчеты для прямоугольников с соотношениями сторон *h/b* = 0.25, 0.5, 0.6, 1, 1.5 и 2 (рис. 2). Опираясь, например, на экспериментальные данные для сечения *h/b* = 0.25, подбирался шаг интегрирования при разбиении 20×5. В случае при Δt =1/4 получается коэффициент нормальной силы c_y = 2, коэффициент поперечной силы c_x = ± 0.3 и число Струхаля *Sh* = 0.172. Для остальных прямоугольников шаг интегрирования и расстояние между присоединенными вихрями не менялись. Как видно из рис. 2, расчет при Δt =1/4 не может спрогнозировать всплеск коэффициента лобового сопротивления $c_y \approx 3$ при *h/b* = 0.6. Но при этом частота срывов вихрей максимально близка к эксперименту для всех *h/b*. Если уменьшить шаг интегрирования до Δt =1/5 зависимость c_y становится ближе к экспериментальной, но число Струхаля немного увеличивается. При обтекании прямоугольников с соотношением сторон *h/b* = 1.5 и 2 число присоединенных вихрей на контуре оказывается не достаточным для обеспечения непроникновения свободных вихрей по торцам внутрь контура. Увеличение числа вихрей устраняет эту проблему, но при этом шаг интегрирования необходимо несколько уменьшить до Δt =1/6, 1/7 или 1/8. При Δt =1/6 для контура *h/b* = 0.6 при разбивке 20×12, расчет показывает наличие максимального c_y.

Следует заметить, для сечения *h/b* = 0.25, чтобы получить $c_y \approx 2$ при разбиении 20×5 шаг интегрирования подбирался варьированием, опираясь на экспериментальные результаты по c_y. Не имея экспериментальных данных, можно получить завышенные или заниженные значения, например, коэффициент нормальной силы $c_y \approx 3.5$ при $\Delta t = 1/8$.

На рис. 3 приведены изменения коэффициентов c_y и c_x в зависимости от безразмерного времени $t' = V_\infty t / b$ для прямоугольника *h/b* = 0.6 при Δt =1/8 и разбивке сторон 40×24. Для данного случая средняя нормальная сила равна 3, а поперечная сила колеблется амплитудой 1.4. Число Струхаля можно определить из зависимости $c_x(t')$, учитывая $Sh = nb / V_\infty = N / t'$, где *N* – число колебаний коэффициента поперечной силы за *t′*. Тогда (рис. 3) за безразмерный промежуток времени от 24.2 до 46.7 поперечная сила совершает 4 колебания, отсюда $Sh = 4/(46.7 - 24.2) = 0.178$. Полученные коэффициенты

на рис. 3 могут служить исходными данными при расчете элементов конструкций прямоугольного сечения на прочность и усталость [17].

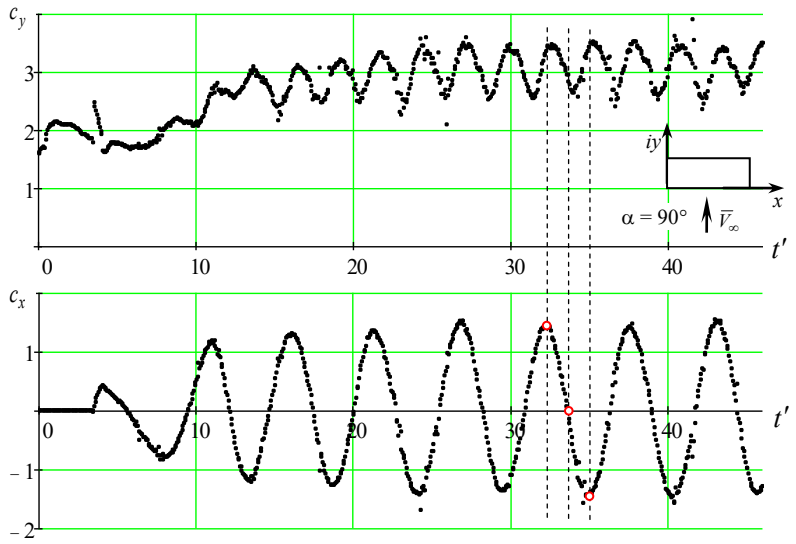


Рис. 3. Изменения коэффициентов c_x и c_y по времени для прямоугольника $h/b = 0.6$
Fig. 3. Time variation of coefficients c_x and c_y for rectangle $h/b = 0.6$

На рис. 4 показаны положения свободных вихрей за прямоугольником для трех случаев: $t' = 32.3125$, 33.6250, 35.0000, когда коэффициент поперечной силы c_x имеет максимальное положительное значение, нулевое и максимальное отрицательное значение (рис. 3). Из рисунка видно, что максимальное значение по модулю у поперечной силы возникает, когда один развивающийся вихрь, под влиянием отрывающегося, прижимается на подветренную сторону прямоугольника. Поперечная сила исчезает, когда вихрь, на подветренной стороне, развиваясь, начинает отходить, запуская вихрь с противоположной стороны.

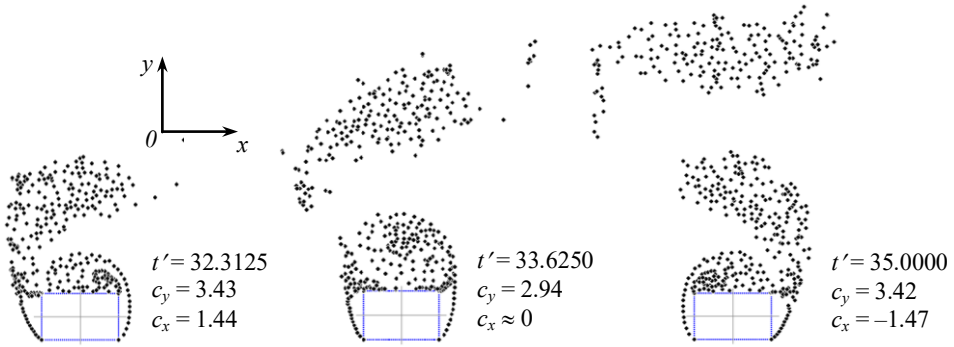


Рис. 4. Расположения вихрей при максимальных и минимальных значениях c_x для $h/b = 0.6$
Fig. 4. Vortex arrangements at maxim and minimum values of c_y for $h/b = 0.6$

На рис. 5 представлены распределения коэффициента давления по поверхности прямоугольника $h/b = 0.6$ при максимальной поперечной силе и при ее отсутствии (для случая из рис. 3). Когда поперечная сила приблизительно равна нулю, распределение отрицательного давления на обеих сторонах BC и AD прямоугольника примерно одинаково. Но максимальное разрежение возникает на одном из торцов, когда поперечная сила принимает максимальное значение по модулю. В методе дискретных вихрей это хорошо моделируется. За передними комками A и B (рис. 5) отмечается локальный всплеск разрежения, достигающий $c_p = – 8$. Величина разрежения зависит от количества присоединенных вихрей на контуре. Чем больше присоединенных вихрей на контуре, тем детальней получается картина распределения давления.

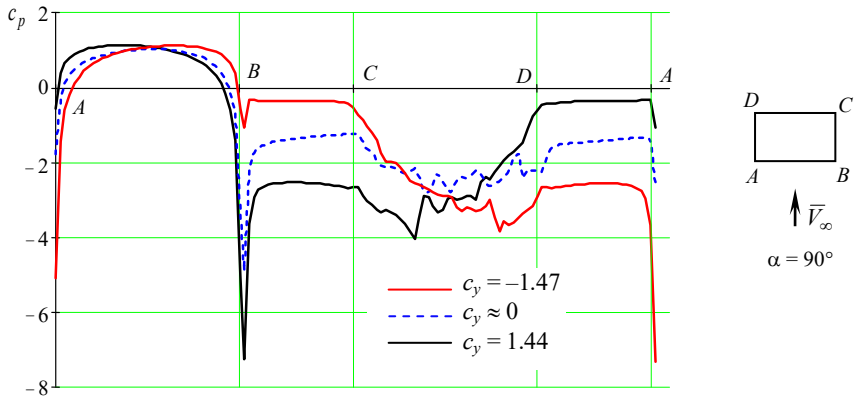


Рис. 5. Распределение коэффициента давления по поверхности прямоугольника $h/b = 0.6$
Fig. 5. Distribution of the pressure coefficient over the surface rectangle $h/b = 0.6$

4. Заключение

1. На основе метода дискретных вихрей был разработан алгоритм моделирования нестационарного отрывного обтекания прямоугольного цилиндра.
2. Разработанный алгоритм был реализован в виде расчетной программы на языке C++ Builder.
3. Проведенные расчеты показали, что:
   – подбором шага интегрирования и числа разбивки (числа присоединенных вихрей на контуре) для определенного прямоугольника можно получить удовлетворительную сходимость с экспериментальными коэффициентами нормальной и поперечной силы. Но при этом получаются несколько завышенные значения по числам Струхаля.
   – использование подобранных параметров для расчета других прямоугольников не всегда гарантирует получение сходства с экспериментальными данными.
4. Приведены рекомендации по выбору входных параметров влияющих на аэродинамические характеристики: шаг интегрирования и количество присоединенных вихрей на контуре прямоугольника.

Периодическое изменение нагрузок на конструкциях прямоугольного сечения может привести к их разрушению. Рассчитанные коэффициенты сил для прямоугольника методом дискретных вихрей позволяют определить действующие нагрузки для конкретного случая обтекания и рассчитать такие конструкций на прочность и усталость.

Получаемое методом дискретных вихрей распределение коэффициента давления по поверхности прямоугольного профиля может быть использовано при расчетах ветровых нагрузок на крепления фасадных панелей многоэтажных жилых домов.

Список литературы/References

1. Faure T. M., Dumas L., Drouet V., Montagnier O. A modified discrete-vortex method algorithm with shedding criterion for aerodynamic coefficients prediction at high angle of attack // Applied Mathematical Modelling. 2019. Vol. 69(Complete). P. 32–46. DOI: 10.1016/j.apm.2018.12.013.
2. Faure T.M., Dumas L., Montagnier O. Numerical study of two-airfoil arrangements by a discrete vortex method // Theoretical and Computational Fluid Dynamics. 2020. Vol. 34. № (1-2). P. 79–103. DOI: 10.1007/s00162-019-00511-0.
3. Ricciardi T. R., Wolf W. R., Bimbato A. M. A fast algorithm for simulation of periodic flows using discrete vortex particles // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2017. Vol. 39, № 11, P. 4555–4570. DOI: 10.1007/s40430-017-0902-x.
4. Nikolaev E.I., Nikolaeva M.N. Development of the discrete vortex cylinders method for calculating the helicopter rotor induced velocity // Russian Aeronautics (Iz VUZ). 2016. Vol. 59. № 1. P. 8-14. DOI: 10.3103/S1068799816010025.
5. Sarpkaya T. Computational Methods With Vortices – The 1988 Freeman Scholar Lecture // J. of Fluids Engineering. 1989. Vol. 111. P. 5–52. DOI: 10.1115/1.3243601.

6. Guoqing Jin, Li Zou, Yichen Jiang, Zhi Zong, Zhe Sun. A circle theorem technique to handle 2-D flows around arbitrary cylinders in discrete vortex method // J. of Wind Eng. and Ind. Aerodyn. 2021. Vol. 209. P. 104496. DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104496.
7. Donald J. Bergstrom, Jian Wang. Discrete vortex model of flow over a square cylinder // J. of Wind Eng. and Ind. Aerodyn. 1997. Vol. 67-68 P. 37-49. DOI: 10.1016/S0167-6105(97)00061-5.
8. Bogusz Bienkiewicz, Richard F. Kutz. Applying the discrete vortex method to flow about bluff bodies // J. of Wind Eng. and Ind. Aerodyn. 1990. Vol. 36. Part 2. P. 1011–1020. DOI: 10.1016/0167-6105(90)90097-V.
9. Taylor I.J., Vezza M. Computation of unsteady wind loading on bluff bodies using a discrete vortex method //J. Wind and Structures. 1999. Vol. 2. № 2. P. 285–303. DOI: 10.12989/was.1999.2.4.285.
10. Guedes V., Bodstein G.C.R., Hirata M. Numerical simulation of the flow around a square cylinder using the vortex method // J. Thermal Engineering. 2004. Vol. 3. № 2. P. 161-167. DOI: 10.5380/RET.V3I2.3537.
11. Okajima A. Numerical simulation of flow around rectangular cylinders // Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics. Vol. 33, № 1–2. 1990. P. 171–180, doi:10.1016/0167-6105(90)90033-9.
12. Sarpkaya T., Ihrig C.J. Impulsively started steady flow about rectangular prisms: experiments and discrete vortex analysis // J. Fluids Eng. 1986. Vol. 108. №1. P. 47–54. DOI: 10.1115/1.3242542.
13. Nagano S., Naito M., Takata H. A numerical analysis of two-dimensional flow past a rectangular prism by a discrete vortex model // Computers and Fluids. 1982. Vol. 10. № 4. P. 243–259. DOI: 10.1016/0045-7930(82)90008-1.
14. Guoqing Jin, Zhe Sun, Zhi Zong, Li Zou, Yingjie Hu. Conformal Mapping-Based Discrete Vortex Method for Simulating 2-D Flows around Arbitrary Cylinders // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9. Iss. 12. P. 1409. DOI: 10.3390/jmse9121409.
15. Белоцерковский С.М., Котовский В.Н., Ништ М.И., Федоров Р.М. Математическое моделирование плоскопараллельного отрывного обтекания тел. – М.: Наука. 1988. 232 с. [Belotserkovsky S.M., Kotovsky V.N., Nisht M.I., Fedorov R.M. Mathematical modeling of plane-parallel separated flow around bodies. – M.: Nauka. 1988. 232 p.].
16. Fraczak J. Numerical Simulation of Separated Flow Past a Circular Cylinder by a Discrete-Vortex Method // J. of Theoretical and Applied Mechanics. 1991. Vol. 22. № 3. P. 75–88.
17. Статья (периодическое издание), Об оценке долговечности пленочно-тканевого композитного материала с учетом влияния климатических факторов, издательство: ФГБУН Институт прикладной механики РАН, Россия, 2019, 98-102 с., 0 п.л.. Авторы: Мухамедова И.З., Каюмов Р.А., Сулейманов А.М.[Article (periodical), On the assessment of the durability of a film-fabric composite material, taking into account the influence of climatic factors, publisher: FGBUN Institute of Applied Mechanics RAS, Russia, 2019, 98-102 pp., 0 p.s. Authors: Mukhamedova I.Z ., Kayumov R.A., Suleimanov A.M.]

Информация об авторах.

Анвар Василович Гумеров, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.
E-mail: anvar_gumerov@list.ru

Information about the autors.

Anvar V. Gumerov, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
E-mail: anvar_gumerov@list.ru

УДК: 711.581
DOI: 10.52409/20731523_2022_3_119
EDN: FXALHC

Исторический центр Казани - между преобразованием и сохранением

А.А. Дембич[1] ,О.А. Балтусова[2]
[1]Казанский государственный архитектурно-строительный университет , г. Казань, Российская Федерация
[2]Аппарат Президента РТ, г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: в статье анализируются основные действующие документы, связанные с развитием исторических поселений. На примере Казани описывается современная ситуация развития исторического поселения, где одной из ключевых задач является разрешение существенного антагонизма между необходимой столице республики представительской функцией и регламентами, нацеленными на сохранение планировочных и архитектурных качеств городской среды.

В статье описываются механизмы, которые должны стать основанием для корректировки действующей градостроительной документации на территории исторического поселения, быть публичными и формализованными.

Цель исследования – определение, выявление и сохранение историко-культурной идентичности города при градостроительной реконструкции городской архитектурно-пространственной среды на примере территории исторического поселения Казани, посредством выделения преимущественных принципов архитектуры и градостроительства, характерных для данного поселения, для их сохранения и при изменениях среды в ходе нового строительства. Актуальность исследования обусловлена присвоением в 2017 году центральной части Казани площадью 22,5 кв. км. статуса «исторического поселения».

Основные результаты исследования состоят в формировании методики сохранения и рационального развития историко-культурной идентичности крупного исторического поселения на примере города Казани.

Сделан вывод, что разработанная методология имеет важное практическое значение и может быть учтена в реальной градостроительной практике, нацеленной на регенерацию, реновацию и реконструкцию сложившихся исторических территорий.

Ключевые слова: историко-культурная идентичность, регенерация, планировочная структура, объёмно-пространственный регламент, историческое поселение.

Для цитирования: Дембич А.А., Балтусова О.А. Исторический центр Казани - между преобразованием и сохранением//Известия КГАСУ 2022 №3(61), С.119-129, DOI:10.52409/20731523_2022_3_119, EDN: FXALHC

The historical center of Kazan - between transformation and preservation

A.A. Dembich[1], O.A. Baltusova[2]
[1]Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
[2]Presidential Administration, Kazan, Russian Federation

Abstract: The article analyzes the main existing documents related to the development of historical settlements, describes the current situation of the development of a historical settlement on the example of Kazan, where one of the key tasks is a significant antagonism between the representative function necessary for the capital of the republic and regulations aimed at preserving the planning and architectural qualities of the urban environment.
The article describes the mechanisms that should become the basis for the correction of urban planning documentation on the territory of a historical settlement, be public and formalized.
The purpose of the study is to determine, identify and preserve the historical and cultural identity of the city during the urban reconstruction of the urban architectural and spatial environment on the example of the territory of the historical settlement of Kazan, by highlighting the positive qualities of architecture and principles of urban planning characteristic of this settlement, for their preservation and with a qualitative change in the environment during new construction. The relevance of the study is due to the assignment in 2017 of the central part of Kazan with an area of 22.5 sq. m. the status of a "historical settlement".
Results. The main results of the study consist in the formation of a methodology for the preservation and adequate development of the historical and cultural identity of a large historical settlement on the example of the city of Kazan.
Conclusions. The developed methodology is of great practical importance and can be taken into account in real urban planning practice aimed at regeneration, renovation and reconstruction of existing historical territories.

Keywords: historical and cultural identity, regeneration, planning structure, spatial regulation, historical settlement.

For citation: Dembich A.A., Baltusova O.A. The historical center of Kazan - between transformation and preservation // News KSUAE 2022 №3(61), P. 119-129, DOI:10.52409/20731523_2022_3_119, EDN: FXALHC

1. Введение

Проблемы сохранения исторической среды при реконструкции городов были в фокусе всех специалистов по городскому развитию во всей стране, начиная с последней трети прошлого столетия. Вслед за многочисленными теориями, принципами, наработкой практического опыта в Европе, в нашей стране тоже складываются представления о том, что исторический город отражает ценности, которые общество стремится сохранить, поскольку эти ценности являются хранителем коллективной памяти и устанавливают связь времен, оберегают традиции, доставляют эстетическое удовольствие, определяют идентичность и уникальность места [1].

Период конца XX - начала XXI века повлиял на особенности градостроительного развития городских территорий в нашей стране не только появлением права собственности на объекты недвижимости и стремительной автомобилизацией населения, и, соответственно, ростом его мобильности, но и существенными изменениями в балансе основных видов деятельности. В период, между 1998 и 2003 годами произошёл существенный «перелив» рабочих мест из сферы промышленного производства в сферу услуг. За этот период из промышленности в сферу услуг в Казани переместилось более 150 тысяч человек. Эти факторы чрезвычайно сильно повлияли на современное градостроительное развитие центральной части Казани.

С ростом автомобилизации, доступность любых участков города стала измеряться не расстоянием, а временем поездки. На смену территориальной доступности и связности, пришли проблемы хранения автомобиля, хороших современных дорог, транспортных заторов и парковочных пространств вблизи мест приложения труда и центров обслуживания населения.

Сегодня, очевидно, что задача сбалансированного развития центра города состоит не только и не столько в том, чтобы сохранить, путём сдерживания этажности и грамотной парцелляции, его историко-культурную идентичность. А в том, что центр концентрирует наибольшую активность городского населения (даже агломерационного), сохраняя, при этом, на довольно значительных участках городской территории функционально-пространственные и стилистические характеристики традиционной для Казани городской среды.

При этом неизбежно должны определиться участки городской территории (и это должны быть зоны вокруг узлов градостроительного каркаса), как ареалы преимущественной концентрации административно-деловых объектов вокруг наиболее значимых транспортно-пересадочных узлов, соответствующие по своему облику столичной функции города XXI века [2].

В Европе официальная теория сохранения городской среды, основанная на понимании исторического города как территории – наиболее емком, неповторимом и всеобщем культурным символом поселения, постепенно складывается на протяжении XX столетия, а в последние пятьдесят лет определяются и отрабатываются на практике правовые инструменты защиты, направленные на частичное или полное сохранение характера исторических территорий. В основе всех этих разработок – качество физического пространства, самобытность, сохранение «духа места», специфических духовно-деятельностных аспектов жизни исторических поселений-нематериального, или «неосязаемого» наследия (intangible heritage) [3].

Система признанных на мировом уровне методических принципов зафиксирована в «Конвенции об охране всемирного наследия» 1972 года, «Рекомендации об исторических городских ландшафтах» 2011 года и целом ряде других международных документов.

Несколько иная история методических подходов к сохранению исторического архитектурного наследия в отечественной практике. В отечественном законодательстве с середины 1960-х годов историческая среда охранялась путём установления зон охраны памятников истории и культуры. Городской ландшафт с исторической застройкой принимался только как окружение отдельных объектов или ансамблей, получивших охранный статус, но никак не воспринимался как самостоятельная ценность. Такой подход был законодательно закреплён в первом в истории нашей страны законе об охране памятников истории и культуры 1976 года. На практике это выражалось в «штучном» сохранении отдельных объектов, и уже в 1980-х годах обозначилась малая эффективность такого подхода. Множество прикладных исследований по всей стране, в том числе посвященных Казани и другим, как их принято было называть, «малым историческим городам» Татарстана, направляются в этот период на поиски подходов к эволюционной реконструкции больших градостроительных фрагментов, сохранению контекста городской среды.

В 1990 году на совместной коллегии Минкультуры РСФСР, коллегии Госстроя РСФСР и президиума ЦС ВООПИиК был утверждён Список более 500 исторических городов населённых мест, главным критерием которого было наличие «архитектурных памятников, градостроительных ансамблей и комплексов, представляющих историческую ценность», хотя и существенно сокращенный впоследствии. Исторический город трактовался как комплексный памятник истории и культуры. Российский Закон об охране объектов культурного наследия 2002 года, ещё раз существенно сократив количество исторических поселений, закрепляет понятие «историческое поселение», перечисляет материальные составляющие предмета охраны. При этом идеология предмета охраны предполагает только сохранение, жёстко обозначая границы того, что не подлежит никаким изменениям. Такой консервативный подход привел в конечном итоге к тому, что охраняемый объект из «живого» участника городских процессов превращается в мёртвый музейный предмет, так как в действующей интерпретации

«предмета охраны» исключается возможность развития, поскольку «развитие» несёт за собой эволюционные изменения.

Распространение в современном мире глобальных процессов развития создало ощутимое напряжение в сфере сохранения исторической городской среды. С одной стороны, претерпевают корректировку критерии и принципы, основанные на историко-ориентированной реконструкции городов, с другой стороны, процессы изменений ускоряются из-за социальных трансформаций, в нашей стране обусловленных экономическими и политическими причинами (джентрификация, туризм, давление рынка недвижимости внутри и вокруг исторических городов) [4,5]. Все это создает значительную угрозу историческому облику городов, хотя города – это почти всегда динамически развивающиеся организмы. Подобная угроза утраты идентичности характерна и для Казани. Для предотвращения этой угрозы, по заданию Президента Республики Татарстан, была сформирована междисциплинарная рабочая группа специалистов, в задачу которой входил анализ основных, регламентирующих городскую реконструкцию документов 20 века[1]. Было необходимо определить актуальные положения и концепции, связанные с развитием исторических поселений, выявить тенденции городского планирования, связанного с охраной историко-архитектурного наследия [6-8]. Важно аргументировать процесс формирования и законодательного закрепления охранной документацией состояния сложившиеся среды, когда Российские города приобретают статус исторических поселений.

В работе группы формулируются вопросы и ответы, которые должны обеспечивать устойчивое развитие исторического центра Казани, а также выделяются основные элементы системы охраны культурного наследия и механизмы регенерации исторических территорий и устойчивого развития исторических поселений [9]. Исходя из многопланового объема материалов, полученного рабочей группой, включающей градостроителей, архитекторов, экономистов, социологов и историков, в 2018-2019 годах была сформирована «Концепция устойчивого развития исторического поселения г. Казань»[10] (далее Концепция). В данной Концепции определились основные параметры сохраняемой архитектурной среды и методика развития исторического поселения Казани.

В первой части Концепции раскрыта теоретическая база мировой и отечественной проблематики в области градорегулирования, изучены проблема и опыт сохранения историко-культурной идентичности и развития исторических городских поселений в СССР и в постсоветской России[2].

Во второй части Концепции предложен инструментарий для развития исторического поселения. Для того чтобы разработать научно обоснованное представление о развитии территории и выполнить поставленные задачи в рамках разработки Концепции, исследователями, впервые для российских городов-миллионников была применена двухкомпонентная методика документирования материального и нематериального городского наследия. Хотя надо отметить, что ещё 30 лет назад этот вопрос неоднократно ставился специалистами, занимающимися архитектурно-

[1] Конвенция об охране всемирного культурного и природного наследия. (16.11.1972) 17-я генеральная конференция Организации Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культцры;

-Международная хартия по консервации и реставрации памятников и достопримечательных мест (Венецианская хартия) от 31 мая 1964 года;

-Европейская хартия об охране архитектурного наследия. Страсбург, 26.09.1975;

-Декларация о сохранении исторических городских ландшафтов (Венская декларация) (принята на 15-й сессии Генеральной ассамблей государств-сторон Конвенции об охране всемирного культурного и природного наследия; Вена, 2005).

[2] - Федеральный закон от 25 июня 2002 г. № 73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (пвмятниках истории и культуры) народов Российской Федерации»:

- Федеральный закон от 06.10.2003 N 131-ФЗ (ред. От 19.11.2021, с изм. От 23.11.2021) «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации»;

- Приказ Министерства культуры РФ и Министерства регионального развития РФ от 29 июля 2010 г. N 418/339 «Об утверждении перечня исторических поселений».

градостроительной проблематикой – «город – это структура не только материальных объектов – субстрата, но и структура процессов в них – субстанций» [11].

Авторы Концепции определили, какие механизмы для исследуемой территории должны стать основанием для корректировки градостроительной документации, документации территориального планирования, градостроительного зонирования, а также документации по землепользованию, быть публичными и формализованными.

Однако, несмотря на широкий охват проблематики территории исторического поселения г. Казань, большой объём проделанной работы и признание успешности выдвинутых предложений, за границами Концепции остались вопросы, рассмотреть которые стало необходимо в этой статье.

Целью данной статьи является разрешение проблематики, возникающей между необходимостью сохранения исторической планировки и застройки центральной городской территории и повседневным функционированием этой части города, осуществляющей столичные функции.

К основным задачам градостроительного развития территории исторического поселения Казани, которые необходимо раскрыть в материалах данной статьи относятся:

– корректировка методики градостроительной реконструкции центральной части г. Казани, учитывающая её современное состояние;
– корректировка методических подходов к разработке концепции устойчивого развития исторического поселения г. Казань, разработанной в 2018-2020 г.г. по заданию Президента РТ Р.Н. Минниханова.
– формирование градостроительного каркаса территории исторического поселения, с учётом сложившейся транспортной инфраструктуры и знаковых функциональных и историко-культурных объектов;
– разработка целостной градостроительной концепции реконструкции территории исторического поселения г. Казань, включая дорожную карту её реализации.

2. Материалы и методы

Опираясь на материалы Концепции и, в дополнение к ней, в настоящей статье акцент сделан на вопросах формирования градостроительного каркаса территории исторического поселения, поскольку именно компоненты городской среды, образующие этот каркас, играют ключевую роль в устойчивом развитии этой городской территории, образуют имидж и бренд исторической Казани [12-14].

В качестве инструментария исследования использована литература по истории архитектуры города, включая генеральные планы и проекты зон охраны памятников Казани, издания разных лет, выделяющие наиболее знаковые объекты, активно функционирующие общественные пространства и городские улицы. Данное исследование позволило определить наиболее устойчивые элементы городской структуры, сохранившие свои планировочные, визуальные, а иногда и функциональные характеристики до настоящего времени, которые бесспорно является ключевыми компонентами градостроительного каркаса.

За границами Концепции и вне её внимания осталось вполне очевидное «расслоение» территории на участки с высокой концентрацией городской активности (транспортные магистрали, участки объектов, привлекающих большие потоки посетителей) и участки с преобладающим размещением жилой функции и мест спокойного тихого отдыха. Это расслоение позволяет в материалах этой статьи интерпретировать представление о перспективном градостроительном каркасе, как о дуалистической системе, состоящей из двух обособленных, но взаимодействующих подсистем – два субкаркаса территории:

– административно-делового каркаса (АДК),
– рекреационно-ландшафтного каркаса (РЛК).

Связность АДК обеспечивается «деловым движением», связность РЛК – «прогулочным движением» [15].

Первый субкаркас (АДК) – это концентрация объектов административно-делового и эпизодического торгового назначения вблизи наиболее значимых транспортных магистралей.

Второй субкаркас (РЛК) – это рекреационно-ландшафтный каркас, где формируется концентрация жилых зон, объектов питания, торговли повседневного уровня обслуживания и зелёных устройств, вблизи пешеходных коммуникаций. Подобная дифференциация предусматривает разделение всей системы кварталов территории исторического поселения (ИП) г. Казань на две группы « квартальных кластеров», где существующие городские кварталы объединены в отдельные группы кластеров, в зависимости от своей принадлежности к одному из субкаркасов.

Использование инновационного представления о градостроительном каркасе, как о дуалистической системе, позволяет по новому интерпретировать методику развития территорий, при условии сохранения историко-культурной идентичности городской пространственной среды.

Если жизнедеятельность квартальных кластеров административно-делового и торгового назначения связана с активной деятельностью в рабочее время и большим потоком транзитного населения, организованного туризма, то квартальные кластеры жилого и рекреационного назначения, больше ориентированы на нужды постоянного населения и обслуживание индивидуальных туристов во время их прогулочного движения.

Нематериальное городское наследие или метафизику города изучают социология, культурология, антропология. Лицо города, облик города воплощает физическая сторона городского наследия. Физическое или материальное наследие изучает городская морфология. Объединение этих двух компонентов, материального и нематериального, позволяющих получить реальный и уникальный синергетический эффект, стали базой исследования центральной части Казани.

В этих материалах раскрывается последовательность трансформации планировки города от естественно сложившейся и относительной хаотичной радиально-концентрической планировки, в сторону регулярной квартальной сетки, заложенной городским планом, подготовленной зодчими Василием Кафтыревым и Алексеем Квасовым, в 1768 году утвержденным императрицей Екатериной Второй. Хотя, впоследствии и существенно видоизмененным – в ходе планировочных мероприятий, происходящих в период Сталинской индустриализации и последующего строительства позднего Советского времени.

3. Результаты

На основе исследований города, положивших начало всей разработке Концепции, сформировано понимание того, что территория исторического поселения Казани совпадает с фактическими границами города конца XIX – начала XX века, и в планировочном и композиционном смысле является обособленной функционально-пространственной структурой. Своего рода городом в городе. Стало очевидным, что действующая в настоящее время градорегулирующая документация и общепринятые в российской градостроительной практике методические подходы не способны эффективно обеспечивать системное развитие территории исторического поселения.

Выстроив научный инструментарий исследования и сформировав «руководящую парадигму» Концепции, были предложены меры по реализации основных направлений развития исторического поселения:

– закрепление основных предложений развития территории исторического поселения в нормативно-правовой базе;

– закрепление основных предложений развития территории исторического поселения в градостроительной документации с целью сохранения и развития ценных компонентов городского наследия: ландшафта, улиц, кварталов и застройки;

– механизм для координации действий между различными заинтересованными сторонами как государственного, так частного сектора – планы развития приоритетных территорий в форме локальных проектов.

В течение всех этапов работы на протяжении двух лет все предложения Концепции многократно сверялись и тестировались, с учётом интересов всех заинтересованных участников, влияющих на изменения в историческом центре.

Таким образом, значение 2-х летней работы над Концепцией не ограничивается проектными предложениями и разработанными регламентами, а в такой же степени ценноприобретёнными в процессе успешными практиками, которые в свою очередь неформально влияют на характер отношения к историческому городскому наследию.

Предложенный в данной статье метод дифференцирования градостроительного каркаса на его составные части в виде двух субкаркасов, создаёт дополнительный операциональный инструментарий, как для исследования территории, так и для рациональных проектных решений и реальной практики градостроительной реконструкции.

4. Обсуждение

Первая часть Концепции была посвящена выявлению проблем в сохранении исторической среды в условиях активной новой застройки на территории исторического поселения Казани. В первую очередь, это озабоченность значительной части общественности, руководства Татарстана и города Казани, по мере осуществления процессов нового строительства, и заметной утратой историко-культурной идентичности городской среды, а также нивелированием когда-то характерных, узнаваемых особенностей Казани, достигла предела на рубеже 20-21 века. Ключевым аспектом этой проблемы является противоречие между задачей сохранения идентичной планировки и застройки территории исторического поселения Казани, во многом совпадающей с центральной частью города [1], и задачей позиционировать Казань, как один из самых современных и успешных центров развития и деловой жизни в Российской Федерации. А, как известно, именно центр города, прежде всего, формирует его имидж [16].

Поиск компромисса, между неизбежной изменчивостью живой городской среды и стремлением сохранить материальную и социальную структуру исторически сложившегося городского функционально-пространственного комплекса – тема многочисленных дискуссий, исследований, практических разработок для территорий разного масштаба, от исторических центров крупных городов до небольших локальных проектов.

Как правило, исторически застройка центральной части города всегда отличалась повышенной плотностью, более высокой этажностью и количеством высотных акцентов – ориентиров. Причём размещение застройки повышенной этажности и высотных ориентиров всегда концентрировалось вокруг площадей и наиболее значимых улиц. Теория и практика современного градостроительства также демонстрирует особое значение пространственной организации и эффективного использования территории центральной части в городах - местных политических центрах. В крупных городах, с целью сохранения исторической архитектурной среды центра города, довольно часто используется приём «сдвига» деловой зоны городского центра на периферию исторической части или вынос непосредственно за её границу, вдоль наиболее значимых транспортных коммуникаций, как, например: Дефанс в Париже, Доклендс в Лондоне, Хафен-Сити в Гамбурге, Москва-Сити – в столице РФ [17]. Этот прием требует особого решения функциональной и планировочной организации территории, создания особых экономических и правовых условий её развития, а значит соответствующей корректировки всего комплекса градостроительных документов. В этих условиях особенно важным и актуальным представляется разработка градостроительного каркаса планировочной структуры Казани и, в первую очередь, её центральной части.

Особенностью исторического развития Казани явилась трассировка практически всех основных транспортных связей между правобережьем и левобережьем реки Казанки, через ядро исторического центра. Как результат этой планировочной особенности города явилось очень заметное уплотнение градостроительного каркаса в районах, расположенных у берегов Казанки. В более ранний период (XX век) - в зонах примыкания к Кировской и Ленинской дамбе, а позднее – к мосту Миллениум и к третьей транспортной дамбе. При этом, даже поверхностный анализ показывает, что ресурсный потенциал градостроительного каркаса в центральной части города еще далеко не исчерпан.

Согласно положениям «общей теории городского развития» [18], разработанной в многочисленных научных публикациях Алексея Гутнова[3], эффективное функционирование градостроительной системы (города) в её фактических границах происходит «при не до конца использованном потенциале каркаса или при некоторой его избыточности, до полного израсходования его ресурсного потенциала». В других случаях начинается активное формирование новых элементов каркаса на периферии градостроительной системы [19].

Сегодня вполне очевидно, что мы не наблюдаем особой активности формирования градостроительного каркаса в периферийных частях Казани, что свидетельствует о ещё имеющихся ресурсах в центральной части.

Историческая часть территории центральной части Казани, наряду с ревалоризацией архитектурного наследия, будет развивать свой градостроительный каркас, соблюдая при этом принцип адаптации его объектов к контексту существующей городской пространственной среды.

Анализ территории и опыт реконструкции центральных зон крупных исторических городов показывает, что соотношение территорий узлов каркаса и территорий, сохраняющих историко-культурную идентичность, по площади может составлять примерно 1 к 3 - 1 к 5. Ареалы узлов каркаса достаточно легко обозначить, зная перспективы развития транспортной инфраструктуры города и степень сохранности исторической среды на примыкающих к этим узлам участках городской застройки. Бесспорно, по высотным параметрам необходимо руководствоваться Проектом зон охраны Казанского Кремля.

Однако, с учётом перспективы развития транспортной, торгово-обслуживающей, зелёной инфраструктуры и площадок возможного жилищного строительства и реконструкции, можно предварительно определить местоположение важнейших узлов градостроительного каркаса и зон их влияния на территории исторического поселения Казани. Территория зон влияния этих градостроительных узлов будет отличаться высокой плотностью застройки, наличием ёмких перехватывающих парковок (до 500-600 машиномест), низким процентом жилой застройки (от 20% до 30% территории), размещением локальных градостроительных ориентиров.

В совокупности с утвержденной Концепцией и дополнив её дуалистической системой градостроительного каркаса, фактически формируется новая доктрина процесса градостроительной реконструкции исторических центров крупных городов.

Учитывая историю и проблематику современного развития, градостроительную доктрину исторического поселения Казани, в этой статье можно определить, как сохранение историко-культурной эстетической и функционально-пространственной идентичности в сочетании с адекватной современным условиям, репрезентативностью наиболее значимых и активно используемых общественных пространств [20].

То есть, учитывая ландшафт и размер территории исторического поселения Казани, а также разнообразие среды, сложившееся на этой территории за счёт многовекового взаимодействия двух культур в пространстве города, и при этом, гармоничное включение репрезентативных объектов, формирующих имидж «столичности», - все это в совокупности являются главным фактором яркого и уникального облика столицы Татарстана, при сохранении её функционально-пространственной связности и органичности общему архитектурному и ландшафтному контексту города. Такая постановка задачи, в свете академичного подхода к градостроительной реконструкции, является относительно новой интерпретацией традиционной методики и практики реконструктивной деятельности.

Крайне важно отметить, что этапы реализации фрагментов каркаса, продолжительность которых кратна трёхлетнему циклу, заданного действующей в России системой государственного планирования, должно закреплятся комплексом показателей-индикаторов, которые, в свою очередь, позволят разработчикам и

[3]А.Э. Гутнов – (1937-1986) – доктор архитектуры, известный советский теоретик архитектуры и градостроительства.

уполномоченным службам муниципального управления Казани контролировать эффективную реализацию Концепции.

В соответствии с основной идеей настоящей публикации является необходимость сохранить и ярче проявить историко-культурную идентичность центра Казани, обеспечив при этом его художественную выразительность и политическую репрезентативность. Учитывая, что функцию репрезентативности в значительной степени возьмут на себя узлы градостроительного каркаса, сейчас важно выделить три базовых характеристики территории, призванные обеспечить ее идентичность.

Первой из таких характеристик, безусловно, является ландшафт территории. Специфические природные формы ландшафта как базовая основа идентичности, во многом определили планировочную структуру и архитектуру центра Казани.

Историческая планировочная структура, сложившаяся в значительной степени в ходе проводимой Екатериной Второй политики урегулирования планировки российских городов, стала второй базовой характеристикой этой территории.

К третьей характеристике следует отнести особенности парцелляции территории и ее застройку. В рамках этой характеристики, в Концепции было выявлено 9 типов исторической застройки, определены допустимые параметры планируемой новой застройки и особенности размещения новых объектов в существующей архитектурной среде, а также их локализация на территории исторического поселения.

Взаимодействие этих базовых характеристик с процессом формирования и развития дуалистической системы градостроительного каркаса, обозначенного в этой статье определяют основную цель и задачи обновления Концепции, подготовленной в 2019 году, дополняя её и открывая дополнительные возможности для подготовки необходимой проектной документации.

Таким образом, можно сделать вывод, что территория исторической части Казани, адекватная границам исторического поселения, в обозримом будущем будет продолжать трансформироваться, вмещая все новые объекты жилой и офисной недвижимости, как за счет реконструкции существующей, так и нового строительства.

5. Заключение

Таким образом, утверждённая в 2020 г. Концепция, в совокупности с материалами данной статьи, открыла возможность решения важнейших градостроительных задач.

1. Исследование особенностей сложившегося в Казани градостроительного каркаса позволяют обоснованно спрогнозировать дальнейшую трансформацию и развитие этой части города.
2. Исходя из предложенной в статье скорректированной доктрины градостроительного преобразования исторического центра города, с учетом сохранения ее историко-культурной идентичности необходимо расширить подготовленную в 2019-2020 годах Концепцию устойчивого развития исторического поселения г. Казань, формируя градостроительный каркас этой территории как двойственную (дуалистическую) функционально-пространственную систему, состоящую из двух обособленных, но связанных субкаркасов: административно-делового и рекреационно-ландшафтного.
3. Дальнейшее формирование и развитие градостроительного каркаса центральной части города необходимо обеспечивать исходя из представления о нем, как о двойственной (дуалистической) функционально-пространственной системе.
4. Реализация Концепции возможна лишь в случае синтеза предложений по регламентам и проектам пространственного развития и предложений в сфере социально-культурного программирования. Предложения должны реализовываться исходя из принципов преемственности опыта и знания, устойчивости, основанной на балансе интересов власти, бизнеса и общества, ценностей эволюционного развития.

Список литературы/ References

1. Бандарин Ф. Рон В. О. Исторический городской ландшафт: управление наследием в эпоху урбанизма. Казань : Отечество, 2013. - 228 с.[Bandarin F. Ron V. O. Historical urban landscape: heritage management in the era of urbanism. Kazan: Fatherland, 2013. - 228 p.]
2. Творческий коллектив проектирования будущего: Матрица ландшафта. М. : Концептуал, 2018. 352 с.[Creative team of designing the future: Landscape Matrix. M. : Conceptual, 2018. 352 p.]
3. Скалкин А. А. Архитектурная идентичность города: понятие и методология исследования // Architecture and modern information technologies (Архитектура и современные информационные технологии). 2018. № 2 (43). С. 87–97.[Skalkin A. A. Architectural identity of the city: the concept and methodology of research // Architecture and modern information technologies (Architecture and modern information technologies). 2018. No. 2 (43). pp. 87–97.]
4. Kudumovic L. Cultural Landscape Preservation in Bosnia and Herzegovina in the Frame of Tourism Development // TEM Journal. 2020. Vol. 9. Iss. 2 P. 740-749. DOI: 10.18421/TEM92-42.
5. Labadi S., Logan W. Approaches to urban heritage, development and sustainability. In book: Urban Heritage, Development and Sustainabilit. London: Routledge, 2015. 20 p. DOI: 10.4324/9781315728018-1.
6. Keitsch M. Heritage, Conservation, and Development. In: Leal Filho W., Marisa Azul A., Brandli L., Gökçin Özuyar P., Wall T. (eds) Sustainable Cities and Communities. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals. Springer, Cham. 2020. 1008 p. DOI: 10.1007/978-3-319-95717-3_5.
7. Orbaşlı A. Urban Conservation and Regeneration. In book: Architectural Regeneration. John Wiley & Sons Ltd, 2020. P. 97-125. DOI: 10.1002/9781119340379.ch5.
8.Айдарова Г.Н. Деревянные жилые кварталы Казани. Старотатарская слобода: история и современность // Жилищное строительство. 2018. №12. С. 45-49. [Aidarova G.N. Wooden residential quarters of Kazan. Starotatarskaya settlement: history and modernity // Housing construction. 2018. No. 12. pp. 45-49.]
9. Алексеев Ю.В., Сомов Г.Ю., Шевченко Э.А. Градостроительное планирование достопримечательных мест. М. : АСВ, 2012. 176 с. [Alekseev Yu.V., Somov G.Yu., Shevchenko E.A. Urban planning of places of interest. M. : ASV, 2012. 176 p.]
10. Концепция устойчивого развития исторического поселения Казани разработанная в 2018-2020 гг. по заданию Президента Республики Татарстан Р.Н. Минниханова, под руководством архитектора О.А. Маклакова [The concept of sustainable development of the historical settlement of Kazan developed in 2018-2020 on the instructions of the President of the Republic of Tatarstan R.N. Minnikhanov, under the guidance of architect O.A. Maklakov]
11. Глазычев А. Л. Урбанистика. М. : Европа, 2008. – 220 с. [Glazychev A. L. Urbanistics. M. : Europe, 2008. - 220 p.]
12. Sabeeh F., Venus A., Zuhair N. The transformation of the inherited historical urban and architectural characteristics of Al-Najaf's Old City and possible preservation insights // Frontiers of Architectural Research, Vol. 9. Iss. 4. 2020. P. 820-836. DOI: 10.1016/j.foar.2020.07.005.
13. Grazuleviciute-Vileniske I., Seduikyte L., Daugelaite A., Rudokas K. Links between heritage building, historic urban landscape and sustainable development: systematic approach // Scientific Journal of Latvia University of Life Sciences and Technologies. Landscape Architecture and Art. Vol. 17. Iss. 17. 2021. P. 30-38. DOI: 10.22616/j.landarchart.2020.17.04.
14. Zukin Sh. Naked City. The Death and Life of Authentic Urban Places (excerpts). // Journal of Economic Sociology. Vol. 19. Iss. 1. 2018. P. 62-91. DOI: 10.17323/1726-3247-2018-1-62-91.
15. Закирова Ю.А., Билалова И.И. Методы и приемы формирования городских школьных маршрутов. // Академический вестник Уралниипроект РААСН 2019 г., DOI 10.25628/UNIIP.2019.43.4.004 25 с. [Zakirova Yu.A., Bilalova I.I. Formation methods

and techniques urban school routes. // Academic Bulletin of the Uralniiproekt PAACH 2019, DOI 10.25628/UNIIP.2019.43.4.004 25 p.]
16. Денни К. Брендинг территорий. Лучшие мировые практики. М. : Манн, Иванов и Фербер, 2013. 336 с. [Danny K. Territory branding. The best world practices. M. : Mann, Ivanov i Ferber, 2013. 336 p]
17. Стратегический мастер-план: инструмент управления будущим. М. : Strelka Press, 2014 г. 520 с. [Strategic master plan: a tool for managing the future. M. : Strelka Press, 2014. 520 p.]
18. Гутнов, Алексей Эльбрусович. Эволюция градостроительства. М. : Стройиздат, 1984. 256 с. [Gutnov, Alexey Elbrusovich. The evolution of urban planning. M. : Stroyizdat, 1984. 256 p.]
19. Флорида Р.. Новый кризис городов. М. : Точка, 2018. – 342 с. [Florida R. New urban crisis. M. : Tochka, 2018. - 342 p.]
20. Щенков А.С. Реконструкция исторических городов: учебное пособие в 2 частях. Московский архитектурный институт (гос. акад.). - Москва : Памятники исторической мысли, 2013. 419 с.[Shchenkov A.S. Reconstruction of historical cities: a tutorial in 2 parts. Moscow Architectural Institute (state acad.). - Moscow: Monuments of historical thought, 2013. 419 p.]

Информация об авторах.

Александр Алексеевич Дембич. кандидат архитектуры, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: interra.kgasu@mail.ru
Олеся Александровна Балтусова, помощник Президента Республики Татарстан Аппарат Президента РТ, г. Казань, Российская Федерация
Email: obaltusova@gmail.com

Information about the authors.

Alexander A. Dembich, candidate of architecture, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
Email: interra.kgasu@mail.ru
Olesya A. Baltusova, Assistant to the President of the Republic of Tatarstan, Presidential Administration, Kazan, Russian Federation
Email: obaltusova@gmail.com

УДК: 711.011: 7206
DOI: 10.52409/20731523_2022_3_130
EDN:FDMELF

Особенности градостроительного развития поселений городского типа в структуре Казанской агломерации

Ю.А. Закирова[1], А.Р. Сагдиев[2],
[1]Казанский государственный архитектурно-строительный университет
[2]ГБУ «Фонд пространственных данных Республики Татарстан»
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи*. Для многих агломераций моноцентричного типа формирующихся, вокруг городов-миллионников, характерны схожие проблемы территориального развития – перегрузка транспортной сети, отток населения из малых, средних городов, сельских поселений, сверхукрупнение и уплотнение города-ядра, застройка пригородных участков, сокращение площади рекреационных территорий, лесопарковых зон, освоение периферийных территорий по принципу «спальных районов». Определение особенностей развития поселений-спутников в составе агломерации, приоритетных направлений их пространственного развития может помочь в более эффективном и скоординированном пространственном и экономическом развитии территорий. В связи с этим определение устойчивой модели агломерационных территорий – важная и актуальная тема исследований и практической работы специалистов в области территориального планирования и управления развитием территорий. Цель исследования – разработка устойчивой модели пространственно-территориального развития Казанской агломерации. Задачи исследования – анализ пространственного и социально-экономического развития поселений городского типа в структуре Казанской агломерации, выявление ключевых направлений их пространственного развития.
Результаты. Проанализированы демографические данные, показатели занятости и обеспеченности жилищным фондом, уровень социально-культурного и бытового обслуживания, рассмотрены пространственные и социально-экономические характеристики поселений, проанализировано современное использование городских территорий, выявлены проблемы, определены предпосылки формирования пространственно-территориальной модели Казанской агломерации.
Выводы. Детальное изучение особенностей градостроительного развития поселений городского типа в составе Казанской агломерации, уточнение стратегий их пространственного и социально-экономического развития позволит определить принципы территориального развития Казанской агломерации и сформировать комплексную модель ее пространственного развития. Полученные результаты могут быть положены в основу концепции схемы территориального планирования Казанской агломерации.

Ключевые слова: город-спутник, планировочная структура, агломерационный пояс, Казанская агломерация.

Для цитирования: Ю.А. Закирова, А.Р. Сагдиев Особенности градостроительного развития поселений городского типа в структуре Казанской агломерации // Известия КГАСУ №3(61) с.130-146, DOI: 10.52409/20731523_2022_3_130, EDN:FDMELF

Features of urban development of urban-type settlements in the structure of the Kazan agglomeration

Y.A. Zakirova[1], A.R. Sagdiev[2],
[1]Kazan State University of Architecture and Engineering, [2]GBU «Fond prostranstvennykh dannykh Respubliki Tatarstan»,
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* The purpose of the study is to analyze the spatial and socio-economic development of urban-type settlements in the structure of the Kazan agglomeration, highlighting the priority directions of their spatial development. The object of the study is urban-type settlements (Zelenodolsk, Vasilevo, Nizhni Vyazovye, Innopolis, Laishevo) that perform the role of satellite settlements in the territorial structure of the Kazan agglomeration or have the potential to perform this role in the future.
*Results.*The main results of the study are that the features of the development of urban-type settlements in the structure of the Kazan agglomeration are determined, priority directions of their spatial development are identified on the basis of a comprehensive analysis.
Conclusions. The significance of the results obtained for territorial planning lies in the fact that a detailed study of the features of urban development of urban-type settlements within the Kazan agglomeration will determine the principles of territorial development of the Kazan agglomeration and form a model of its spatial development. These developments can become the basis of the concept of the territorial planning scheme of the Kazan agglomeration.

Keywords: satellite city, planning structure, agglomeration zone, Kazan agglomeration.

For citation: Y.A. Zakirova, A.R. Sagdiev Features of urban development of urban-type settlements in the structure of the Kazan agglomeration // News KSUAE №3(61), p. 130-146, DOI: 10.52409/20731523_2022_3_130, EDN:FDMELF

1. Введение

Поиск устойчивых моделей территориально-пространственного развития региона – это важная, актуальная тема исследований и практической работы специалистов в области территориального планирования и управления развитием территорий. В сложившихся территориальных образованиях агломерационного типа, формирующихся вокруг города-миллионника, наблюдается отставание городов-спутников по уровню социально-экономического развития от города-ядра, где сконцентрированы значительная доля ресурсов, места приложения труда, учреждения высшего и среднего специального образования, объекты культуры, развлечений и обслуживания. Это становится причиной многих проблем – перегрузки транспортной сети, оттока населения из малых и средних городов, сельских поселений, сверхукрупнения и уплотнения города-ядра. Одновременно с этими процессами наблюдаются нехватка «свободных» территорий (готовых к быстрому освоению) в границах центрального города и недостаточная покупательная способность части жителей в приобретении жилья в границах города-ядра. Это приводит к его территориальному разрастанию, застраиваются пригородные участки, сокращается площадь рекреационных территорий, лесопарковых зон, водных объектов. Освоение периферийных территорий зачастую происходит по принципу «спальных районов», без создания системы инфраструктурных объектов в структуре новой жилой застройки. Жители таких районов вынуждены получать обслуживание в «центральном» городе, увеличивая нагрузку на существующую транспортную сеть. В часы пик по причине маятниковой миграции на въездных зонах образуются пробки, увеличиваются ежедневные временные затраты на транспортные поездки, ухудшается экологическая обстановка. Такие проблемы также характерны в настоящее время для Казанской агломерации в Республике Татарстан (далее РТ).

Согласно Стратегии социально-экономического развития Республики Татарстан на период до 2030 г. (разработана в 2015 г., актуализирована в 2019 г.) состав Казанской

агломерации следующий: город-ядро Казань и пять муниципальных районов (Зеленодольский, Высокогорский, Пестречинский, Лаишевский и Верхнеуслонский). Пространственную структуру агломерации можно описать как развивающуюся. Так, используя описание территориальной структуры агломерации по Г.М. Лаппо [1], помимо центрального города-ядра агломерации (г. Казань), присутствуют замыкающие городские поселения-спутники. Это г. Зеленодольск, пгт Нижние Вязовые (расположенные в Зеленодольском районе), г. Лаишево (Лаишевский район). При дальнейшем агломерационном развитии территории, г. Арск также можно будет отнести к группе замыкающих поселений, а г. Иннополис (Верхнеуслонский район) и пгт Васильево станут вторым поясом спутников. Поселения-спутники первого пояса пока трудно обозначить. Но необходимо отметить, что начиная с 2014-2015 гг. до настоящего времени наблюдается процесс массового строительства многоквартирного и индивидуального жилья, коммерческих объектов в так называемых «стыковых узлах» на границе г. Казани и пригородного пояса примыкающих административных районов. «Стыковые узлы» в планировочной структуре агломерации можно определить как зоны высокой концентрации коммерческой инфраструктуры и жилой застройки, примыкающие к вылетным магистралям, формирующиеся на границе периферии города-ядра и ближайшей пригородной территорией, усиливающие маятниковую миграцию в центральную зону. В Казанской агломерации наиболее ярко это проявляется в восточном, южном и западном направлениях, на границах с Зеленодольским, Лаишевским и Пестречинским районом соответственно [2]. В разных случаях это могут быть компактные, дискретные и имеющие линейную структуру образования. Стыковые узлы воспринимают повышенную транспортную, функциональную, экологическую нагрузку. В целом этот процесс можно назвать ситуативным, т.к. ни в стратегических документах, ни в схемах территориального планирования строительство жилья в таком объеме, коммерческих объектов не было заложено, соответственно транспортная, инженерная, социальная инфраструктура тоже. Пока эти территории находятся в стадии активного формирования, создавая основу для появления первого пояса спутников и перехода на новый этап пространственного развития агломерации в целом. Пока же в режиме настоящего времени происходит актуализация документов территориального планирования, без осмысления роли этих территорий в пространственной структуре Казанской агломерации [3, 4]. Анализ и изучение стыковых узлов не являются задачами данного исследования, но необходимы для понимания развития планировочной структуры Казанской агломерации и формирования комплексной концепции ее пространственного развития.

В 2019 г. был создан Совет Казанской агломерации, в который входят главы муниципальных районов и мэр ГО Казань, но дальнейших шагов, направленных на согласованное агломерационное развитие, пока не сделано. Это подтверждается аналитическим исследованием «Анализ состояния жилищной сферы на территориях основных российских городских агломераций»[1], проведенным Институтом экономики города и Дом. РФ., в котором Казанская агломерация отнесена к типу агломераций с развитой современной городской экономикой и высоким потенциалом структурных сдвигов, а также слабым уровнем согласованности градостроительной политики между муниципальными образованиями. Согласно исследованию фонда «Института экономики города» «Экономика российских городов и городских агломераций. Выпуск 5» 2020 года[2] Казанская агломерация входит в группу агломераций – региональных центров по уровню валового городского продукта и занимает 9 место среди 45 городских агломераций РФ.

Теоретическая база по вопросам изучения и формирования структуры городских агломераций формируется научными работами Лаппо Г.М. [1], Перцика Е.Н. [5], Любовного В.Я. [6] и др. [7]. Изучены исторические, теоретические предпосылки и концепции формирования системы городов-спутников, субурбии агломерационного пояса [8-10]. Теоретическая и статистическая база по вопросам современного развития

[1] дом.рф/analytics/
[2] https://urbaneconomics.ru/research

российских агломераций представлена трудами специалистов Института экономики города. В частности это работы Полиди Т. Д., Попова Р. А. Пузанова А. С. [11-13].

Анализ опыта пространственно-территориального развития агломераций мира демонстрирует необходимость в переосмыслении развития регионов РФ [14, 15]. В связи с этим в документах стратегического развития, территориального планирования закладываются идеи полифункционального развития, укрепления роли городских поселений-спутников, развития малых и средних городов путем координирования агломерационных процессов [15-17]. В настоящее время вопросы развития агломераций, проблемы отставания городских поселений-спутников обсуждаются на конференциях и в средствах массовой информации.

Цель исследования – разработка устойчивой модели пространственно-территориального развития Казанской агломерации,

Объект исследования – поселения городского типа[3] в планировочной структуре Казанской агломерации (г. Зеленодольск, пгт Васильево, пгт Нижние Вязовые, г. Иннополис, г. Лаишево), выполняющие роль спутника или имеющие потенциал выполнять эту роль в будущем.

Задачи исследования:

1. проанализировать особенности пространственного и социально-экономического развития поселений городского типа в структуре Казанской агломерации,
2. выявить ключевые направления их пространственного преобразования.

2. Материалы и методы

Методика исследования включает изучение тематической научно-методической литературы в области агломерационного развития территории, анализ отечественного, зарубежного теоретического и практического опыта формирования и развития агломераций и городов-спутников. В исследовании были проанализированы демографические данные, уровень жизни населения, а именно показатели занятости и обеспеченности жилищным фондом, уровень социально-культурного и бытового обслуживания. Также рассмотрены пространственные и социально-экономические характеристики каждого городского поселения-спутника, проанализировано современное использование городских территорий, выявлены проблемы, а также приоритетные отрасли современного развития. Изучение территории проводилось комплексно – изучена логистика, места приложения труда, проведен анализ по объектам туризма, учтены природно-ландшафтные факторы, рассмотрены особо охраняемые территории, изучена ситуация расселения, обеспеченность инфраструктурой обслуживания.

В исследовании используются методы натурного обследования территории Казанской агломерации и поселений городского типа в ее границах, анализируются утвержденные документы территориального планирования, существующая градостроительная документация. Материалами исследования также выступали стратегические и программные документы Республики Татарстан и отдельных муниципальных образований.

Анализ стратегической, градостроительной документации выявил наличие в действующем законодательстве понятия Казанская агломерация, формирование которой прописано в Стратегии социально-экономического развития Республики Татарстан на период до 2030 года (далее Стратегия РТ-2030), принятой в 2015 году (актуализирована в 2019 г.). Именно в данном документе, впервые было зафиксировано понятие Казанская агломерация и в общих чертах прописаны ее миссия, структура, границы, направления развития. Роль агломерационного ядра ГО Казань в Стратегии РТ-2030 определяется как научно-образовательный, инновационный и финансовый центр. Расположенные вокруг городские и сельские поселения согласно стратегическому документу «формируют агломерационный пояс, единого, функционально связанного пространства». Также в Стратегии РТ-2030 предлагается перенос части функций из центрального города в города-спутники, организованное развитие пригородов, образование единого рынка

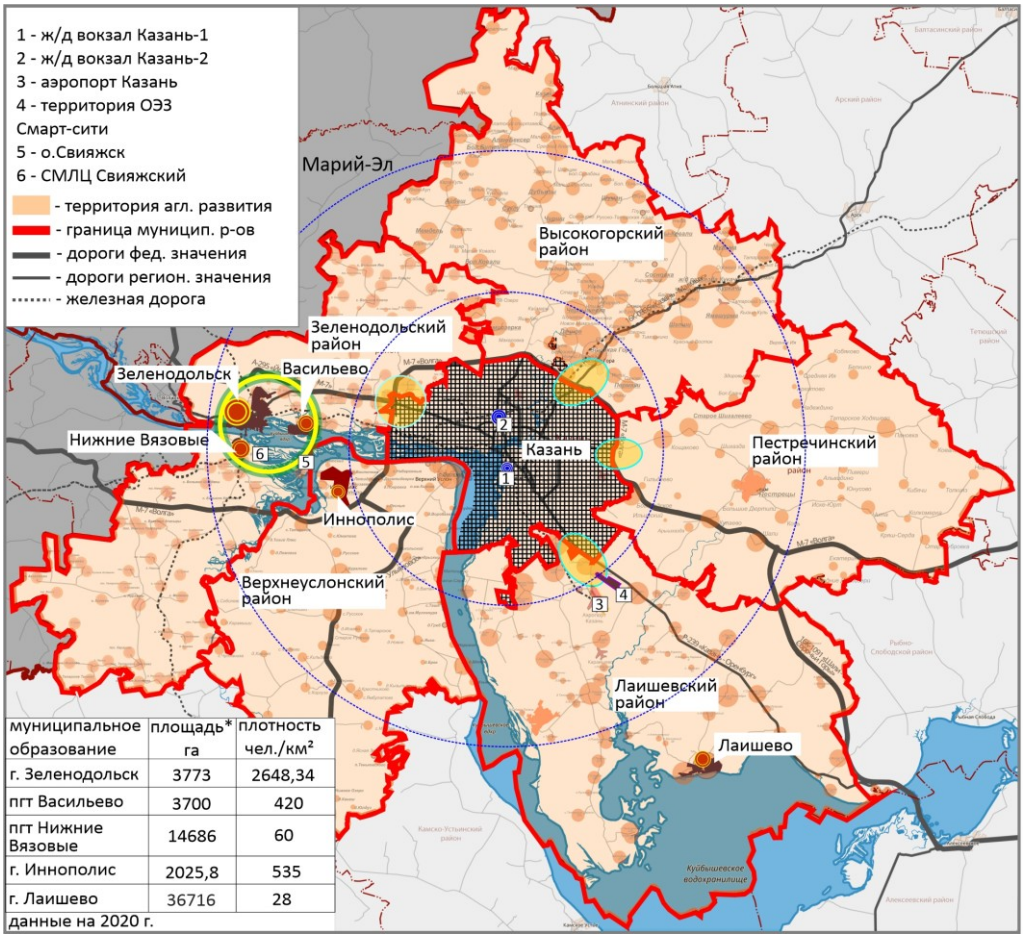
[3] рассматриваются муниципальные образования, имеющие официальный статус города или поселка городского типа.

труда, транспортные преобразования в долгосрочном периоде. Также в Стратегии пространственного развития Российской Федерации[4] на период до 2025 года г. Казань находится в перечне перспективных крупных центров экономического роста РФ, образующих крупные городские агломерации и крупнейшие городские агломерации, которые обеспечат вклад в экономический рост Российской Федерации более 1 % ежегодно.

Материалами исследования выступали данные статистики, результаты натурного исследования авторов, документы стратегического и территориального планирования соответствующих муниципальных образований[5].

3. Результаты и обсуждение

Численность населения города-ядра Казанской агломерации г. Казань составляет 1 257 341 человек (данные на 2021 г.). Общая численность агломерационного населения, вместе с муниципальными районами (Зеленодольским, Высокогорским, Пестречинским, Лаишевским и Верхнеуслонским районом) 1591851 человек[6]. Казанская агломерация является моноцентричным образованиям с ярко выраженным городом-ядром Казань, значительно превышающим численностью и уровнем социально-экономического развития остальные городские поселения агломерации.



муниципальное образование	площадь* га	плотность чел./км²
г. Зеленодольск	3773	2648,34
пгт Васильево	3700	420
пгт Нижние Вязовые	14686	60
г. Иннополис	2025,8	535
г. Лаишево	36716	28

данные на 2020 г.

Рис.1 Схема планировочной структуры Казанской агломерации (существующее положение)

Fig.1 Scheme of the planning structure of the Kazan agglomeration (current situation)

[4] данные с сайта Министерства экономического развития Российской Федерации: https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/

[5] Схемы территориального планирования муниципальных районов, Стратегии социально-экономического развития муниципальных образований, материалы Генеральных планов муниципальных образований доступны на сайте Федеральной государственной информационной системы территориального планирования: https://fgistp.economy.gov.ru/

[6] по данным Федеральной службы государственной статистики: https://www.gks.ru/dbscripts/munst/

Вторым городом по численности после ядра агломерации является город Зеленодольск (100 009 чел.), административный центр Зеленодольского муниципального района. Рядом с городом располагаются два поселка городского типа (с восточной стороны пгт Васильево и с южной на противоположном берегу р. Волга пгт Нижние Вязовые, связь с которым осуществляется при помощи железнодорожного моста, паромной переправой или автомобильным сообщением по федеральной трассе М-7). Кроме того, г. Зеленодольск, находясь на стыке с Чувашской Республикой и Республикой Марий Эл, взаимодействует с городскими населенными пунктами Волжск, Приволжский, Козловка, Урмары, Цивильск.

В таблице 1 представлены общие демографические характеристики поселений-спутников городского типа в составе Казанской агломерации.

Таблица 1

Общие демографические характеристики поселений городского типа в агломерационном поясе Казанской агломерации[7]

Муниципальное образование / дата образования / муниципальный район	Всего население, чел.					Группа по численности
	2005 г.	2010 г.	2015 г.	2020 г.	2021 г.	
г. Зеленодольск /1932 г., с 1958 г. административный центр Зеленодольского муниципального района	99 216	97 674	98462	100 039	100 009	средние города
пгт Васильево /1928 г., Зеленодольский муниципальный район	16 730	16 953	17 420	16 797	16 602	малые города
пгт Нижние Вязовые / 1957 г., Зеленодольский муниципальный район	нет данных	8 169	9 281	8 867	8 781	малые города
г. Иннополис / 2015 г., Верхнеуслонский муниципальный район	-	-	10	405*	1177	малые города
г. Лаишево /1557 г., восстановление статуса города в 2004 г., административный центр Лаишевского муниципального района, входит в перечень исторических городов РФ	7 800	7 735	9 938	10 454	10 512	малые города

* с жителями аренд. жилья 3700 человек по данным сайта tass.ru (https://tass.ru/obschestvo/10866231)

При рассмотрении поселений городского типа, входящих в состав Казанской агломерации, выявлено, что в данный момент г. Зеленодольск является единственным представителем группы средних городов по численности населения, остальные четыре поселения представляют группу малых городских образований с населением до 50 тысяч человек. Также можно отметить, что в настоящее время проявляется существенная диспропорция в системе расселения Казанской агломерации. Например, численность жителей всех пяти муниципальных районов (включая городские поселения) на 2021 год составляла 334 510 человек или 21 % от общей численности жителей Казанской агломерации.

Далее для понимания особенностей социально-экономического развития и уклада жизни жителей в рассматриваемых муниципальных образованиях в составе Казанской агломерации в таблицах 2, 3 представлены данные, характеризующие градообразующую базу муниципальных образований, социальную инфраструктуру и уровень жизни людей.

[7]По данным Федеральной службы государственной статистики: https://www.gks.ru/dbscripts/munst/

Таблица 2

Характеристика градообразующей базы поселений городского типа в составе Казанской агломерации

Муниципальное образование	Градообразующие предприятия МО / отраслевое направление градообразующих предприятий МО	Примечания
г. Зеленодольск, согласно распоряжению Правительства РФ от 29.07.2014 N 1398-р (ред. от 13.05.2016) «Об утверждении перечня моногородов» относится к категории 1 «моногорода с наиболее сложным соц.-экономич. положением»	Зеленодольский завод им. Горького; Производственное объединение «Завод имени Серго» (ПОЗиС); Зеленодольский машиностроительный завод; Зеленодольский молочно-перерабатывающий комбинат.	На территории Зеленодольского муниципального района согласно Постановлению правительства РФ №1611 от 22 декабря 2017 года «О создании территории опережающего социально-экономического развития «Зеленодольск» создана ТОСЭР «Зеленодольск», которая включает площадки: 1) Промышленная площадка «Зеленодольск» (общая площадь 110 га, из них 69 га - площадки для резидентов), вблизи п. Новая Тура; 2) Свияжский межрегиональный мультимодальный логистический центр (СММЛЦ) - 244 га, Нижние Вязовые; 3) Промышленная площадка «Волна» (52 га), между Зеленодольским машиностроительным заводом и распределительным центром «Тандер», в северо-восточной части Зеленодольска.
	-Судостроение; -машиностроение; -деревопереработка; -производство продуктов питания; -складская логистика.	
пгт Васильево	Васильевская нефтебаза; Васильевский хлебозавод, предприятия занимающиеся производством фитингов и полиэтилена (ООО «Эверест Монтаж», ООО «Скала»); предприятия, производящее бетон, песок, ОПГС, гравий, щебень (ООО «Волгадорстрой»); предприятие, производящее резиновые изделия (ООО НПП «Лимб»), предприятия по пошиву одежды (ООО «ПК фирма РМО»), Санаторий Сосновый Бор; Санаторий Васильевский	
	Обрабатывающие производства: нефтеперерабатывающая, пищевая, промышленность строительных материалов, легкая промышленность.	
пгт Нижние Вязовые	ФБУ ИК-5 УФСИН России по Республике Татарстан, при котором находится предприятие по литейному производству, швейный цех; предприятие по переработке пластмасс, Нижневязовский хлебоприемный пункт, животноводческие фермы.	
	Сельское хозяйство: молочно-мясное животноводство и зерновое растениеводство.	
г. Иннополис	АО ОЭЗ «Иннополис», компании-резиденты, АНО ВО «Университет Иннополис», предприятия сферы услуг.	На территории города создана ОЭЗ технико-внедренческого типа, 192,72 га
	Образование, IT-технологии.	
г. Лаишево	Лаишевский рыбозавод, Лаишевская швейная фабрика, Лаишевский пищекомбинат и ряд др. предприятий пищевой промышленности, районная типография, цех по выделке шкур, предприятие по производству и обслуживанию сельскохозяйственной техники.	На территории Лаишевского муниципального района создана особая экономическая зона технико-внедренческого типа ОЭЗ «Иннополис Лаишево», ориентировочно 118 га.
	В сфере производства, которая включает в себя пищевую промышленность, сельское хозяйство и строительство, занято около 40 % от всех работающих, остальные заняты в непроизводственной сфере.	

В муниципальных образованиях наблюдается или развитие специализированной промышленности, или определенной отрасли услуг. Так, Зеленодольск относится к производственному типу, пгт Васильево представляет оздоровительную функцию, на территории пгт Нижние Вязовые осуществляется сельскохозяйственная деятельность, г. Иннополис находится на стадии развития образовательной, научной функции, г. Лаишево развивает рекреационные функции и территории, на которых они реализуются.

Анализируя согласованность перспектив экономического развития в стратегических документах и документах территориального планирования МО, можно отметить следующее:

1) Документы территориального планирования г. Зеленодольск (проект Генерального плана МО «г. Зеленодольск», 2018 г.) учитывают основные направления, заложенные в Стратегии социально-экономического развития Зеленодольского муниципального района на плановый период до 2030 года. В частности: модернизация и диверсификация экономики, создание эффективной логистической системы, использование рекреационного потенциала района, развитие реабилитационного направления и туризма выходного дня.

2) Для пгт Васильево республиканскими и муниципальными программами не предусматривается мероприятий по развитию промышленного производства в МО Васильево, в то время как генеральным планом предлагаются активные мероприятия по развитию промышленного производства.

3) Важнейшим фактором развития пгт Нижние Вязовые является реализация проекта «Свияжский мультимодальный логистический центр». Этот проект заложен и в Стратегии Зеленодольского муниципального района и в генеральном плане МО Нижние Вязовые. Также оба документа предполагают дальнейшее развитие существующих направлений сельскохозяйственного производства.

4) Разработанный для г. Иннополис Генеральный план прямо ссылается на стратегические документы Республики Татарстан и Верхнеуслонского района: «Иннополис – точка экономического роста на территории Верхнеуслонского муниципального района. Это город как уникальная экосистема, обеспечивающая качественную подготовку, высокий уровень жизни и эффективную работу квалифицированных специалистов в области высоких, в том числе информационных технологий»[8].

5) В стратегических документах г. Лаишево и Лаишевского муниципального района говорится о том, что в будущем это территория с невысокой техногенной нагрузкой. Лаишево и Лаишевский муниципальный район как место для жизни предлагается развивать в виде сбалансированной системы – «территория здоровья, отдыха и бизнес-коммуникаций, незабываемое место для гостей и туристов, территория благополучного развития для инвесторов». Генеральный план г. Лаишево во многом соответствует стратегии социально-экономического развития. В частности предлагаются мероприятиями по оптимизации ряда производств, с целью сокращения санитарно-защитной зоны, а также ликвидацию некоторых производств. Также Генеральным планом предлагаются мероприятия по формированию общественных рекреационных зон возле водных объектов (р. Кама).

В настоящее время наиболее устойчивые агломерационные связи сформировались с г. Зеленодольском. По материалам Генерального плана г. Казани в режиме ежедневных трудовых поездок из Зеленодольска в Казань находится 16 тыс. человек, что составляет 16 % населения. Предполагается, что реализация инвестиционных проектов на территории Зеленодольского муниципального района технополиса «Новая Тура» (Октябрьское с.п.) и мультимодального логического центра «Свияжский» (пгт Нижние

[8] Стратегия социально-экономического развития Республики Татарстан до 2030 года, утверждена Законом Республики Татарстан от 17 июня 2015 г. №40-ЗРТ, Стратегия социально-экономического развития Верхнеуслонского муниципального района Республики Татарстан на 2016-2021 годы и на период до 2030 года – документы доступны на сайте Федеральной государственной информационной системы территориального планирования https://fgistp.economy.gov.ru/

Вязовые), позволит обеспечить до 42000 рабочих мест и перераспределить трудовые потоки. Количественные данные по другим населенным пунктам, характеризующие маятниковые передвижения между ними и Казанью, отсутствуют.

Таблица 3

Характеристика уровня жизни в поселениях городского типа в составе Казанской агломерации

Муниципальное образование	Жилищный фонд, тыс. кв. м, на 2020 г.	Жилищная обеспеченность, кв.м/ чел., на 2020 г.	Средняя заработная плата, руб., на 2021 г.
г. Зеленодольск	2507,3***	25	28 000*
пгт Васильево	466,9**	24,1**	26 053**
пгт Нижние Вязовые	167***	18,8	нет данных
г. Иннополис	29,83	нет данных (по расчету 73)	52 500*
г. Лаишево	304,6***	29	27 000*

* по данным Интернет-портал TatCenter, ведущее деловое издание, работающее в Татарстане;

** по данным Генерального плана;

*** по данным Федеральной службы государственной статистики: https://www.gks.ru/dbscripts/munst/

В ядре агломерации г. Казани по данным на 2020 г. жилищная обеспеченность составляет 27 кв. м/ чел, средняя заработная плата по данным на 2021 г. – 45165 руб.

В таблице 4 представлены характеристики пространственного развития поселений-спутников в составе Казанской агломерации.

Таблица 4

Характеристика пространственно-территориального развития поселений городского типа в составе Казанской агломерации

Транспортная связанность с Казанью и др. поселениями	Ландшафтно-географические особенности** Рекреационный потенциал, ООПТ, объекты туризма**	Особенности пространственно-территориальной организации МО
г. Зеленодольск		
Связь осуществляется железнодорожным и автомобильным транспортом, пригородное автобусное сообщение: - Зеленодольск – Казань: 45-50 км, 45-90 мин. (автомобильное, автобусное и железнодорожное сообщение); - Зеленодольск-Нижние Вязовые: на автомобиле: 45-50 км, 45-90 мин. по железной дороге: 5-6 км, 30 мин через паромную переправу: 5 км, 20-30 мин - Зеленодольск-Васильево:	Прибрежное расположение, протяженность береговой линии вдоль р. Волга около 15 км. В структуре города овражная сеть, активный рельеф. Перепад уровней между верхней и нижней террасой составляет 56 м. Рекреационные территории города представлены лесопарками, городским пляжем, парком, скверами. Город не имеет «выхода к реке», т.е. благоустроенные территории на берегу представлены городским пляжем. Пляж находится вне зоны пешеходной доступности от жилых районов, до пляжа нет сообщения городским общественным транспортом. Площадь зон рекреационных территорий 7,83% (394,64 га).	В городе два планировочных района (центральный и северо-восточный) разделены овражной системой, находятся на верхней террасе. На нижней террасе в прибрежной зоне сконцентрировано производство и коммунально-складские предприятия, проходит железная дорога и размещен железнодорожный вокзал, а также индивидуальная жилая застройка. Центральный район имеет квартальную структуру, активно застраивался во вт. пол. XX века по концепции города-сада. Застройка преимущественно среднеэтажная и индивидуальная. Восточный район имеет микрорайонную структуру

45-50 км, 45-90 мин. (автомобильное, автобусное и железнодорожное сообщение)		(многоэтажная застройка), застраивался с 90-х гг. XX века. В настоящее время также активно ведется жилое строительство [18, 19].
пгт Васильево		
Связь осуществляется железнодорожным и автомобильным транспортом, пригородное автобусное сообщение - Васильево – Казань – 40 км, 50-60 мин.	Прибрежное расположение, протяженность береговой линии вдоль р. Волга около 6 км. На территории поселения также расположена часть охранной зоны Раифского участка Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника с высоким рекреационным потенциалом водных объектов (Волжский берег, острова, заливы, озера). На территории МО действуют два лечебно-оздоровительных учреждения – «Санаторий Сосновый Бор» и ЛПУ «Санаторий Васильевский». В северной части поселения расположен памятник природы регионального значения «Ильинская балка». В южной части Васильево на р.Волга располагаются острова, имеющие рекреационную привлекательность для водных прогулок. На побережье расположен пляж, имеется место массового отдыха. Площадь зон рекреационных территорий 0,5 % (19,52 га).	В пгт Васильево жилая застройка представлена в основном усадебной застройкой. В поселке размещены сады и дачи жителей Зеленодольска и Казани. Ключевыми факторами, определяющими планировочную структуру, являются: 1) железная дорога и ж/д станция, а также система автотранспортных связей с Зеленодольском и Казанью, 2) речная сеть и природные ресурсы.
пгт Нижние Вязовые		
Связь осуществляется железнодорожным и автомобильным транспортом - Нижние Вязовые – Казань – 60-65 км, 90-120 мин.	Прибрежное расположение, протяженность береговой линии вдоль р. Волга 1,7 км. Поселение обладает высоким рекреационным потенциалом водных объектов – Куйбышевское водохранилище, озера, родники. На территории расположены объекты истории и культуры, находящиеся под государственной охраной – Церковь Спасская, Церковь Троицкая, Часовня в честь 300-летия дома Романовых. По генеральному плану предлагается организация зоны туристско-рекреационного освоения – Свияжской зоны.	Система расселения пгт Нижние Вязовые имеет двухранговый характер. Первый ранг занимает центр поселения пгт Нижние Вязовые с численностью населения 6178 человек, где размещены административные объекты учреждения образования, культуры, спорта, здравоохранения, предприятия торговли. Второй ранг занимают д. Русские Ширданы, д. Улитино, с. Мизиново, д. Протопоповка, д. Исаково, с. Большое Ходяшево, п. Малое Ходяшево, п. Луговой, с. Бритвино.

г. Иннополис		
45 км (50-60 мин.) от г. Казани по автомобильной дороге, пригородное автобусное сообщение, паромная переправа в п. Новое Аракчино.	Прибрежное расположение, протяженность береговой линии вдоль р. Волга около 900 м. В границы муниципального образования «город Иннополис» входит особо охраняемая природная территория – памятник природы регионального значения «Зоостанция КГУ – массив Дачный». С запада город Иннополис граничит с государственным природным заказником регионального значения комплексного профиля (ГПКЗ) «Свияжский». Город входит в Введенско-Слободскую туристско-рекреационную зону – сложившаяся зона отдыха на базе Горнолыжного спортивно-оздоровительного комплекса «Казань» с участием культурно-познавательных объектов и территорий (Макарьевский монастырь, остров Свияжск и др.). В генеральном плане выделены обширные территории под развитие рекреационных зон в городе. Площадь их составляет 80,5 га.	Планировочная структура города обусловлена местным ландшафтом и природными особенностями местности. В центральной зоне размещены инкубатор, исследовательский центр, здание вуза. К ним примыкают кварталы коммерческого центра и жилья.
г. Лаишево		
62 км (60-90мин) от г. Казани по автодороге федерального значения 1Р-239 «Казань-Оренбург» или пригородное автобусное сообщение	Прибрежное расположение, природные ландшафты (реки Волга, Кама и Меша, леса зеленой зоны, источник минеральных вод и др.), протяженность береговой линии вдоль р. Волга около10 км. Туристско-рекреационная сфера представлена объектами культурно-познавательного, религиозного, лечебно-оздоровительного, спортивно-оздоровительного, рекреационного характера – краеведческий музей, религиозные объекты, историческая застройка, Софийский собор, музей меда и рыбы, Богодельня, Троицкий собор женского монастыря, Белые горы. В 2019 г. благоустроена рекреационная зона пляж Лаишево (Камское море). Площадь зон рекреационных территорий 7,1 % (106,67 га).	Планировочная структура города представляет сетку прямоугольных кварталов, образованных системой взаимно перпендикулярных улиц. Жилая застройка в основном состоит из усадебной и блокированной застройки. Многоквартирная застройка представлена 2-3 этажными домами по ул. Лебедевой. Центр города линейный (ул. Лебедевой, ул. О.Кошевого, ул. Космонавтов, ул. Маяковского).

** по данным Генерального плана

Пространственное развитие Казанской агломерации по данным Генерального плана г. Казани происходит по секторному типу, развиваясь вдоль радиальных транспортных коммуникаций, а также линейного водного объекта р. Волга. Все спутники агломерации имеют прибрежное расположение и находятся в радиусе в 25 – 50 км от ГО Казань. Транспортная доступность г. Зеленодольск, пгт Васильево и пгт Нижние Вязовые обеспечивается с помощью автомобильного транспорта, пригородным автобусным и железнодорожным сообщением. Транспортное сообщение г. Иннополис и г. Лаишево, в

настоящее время осуществляется только с помощью автомобильного движения и пригородных автобусов. Потенциал водных сообщений в данный момент не реализован ни в одном из муниципальных образований. Для Казанской агломерации согласно Стратегии РТ-2030 предусмотрены следующие транспортные преобразования: формирование устойчивого структурообразующего транспортного каркаса агломерации, включающего развитие скоростных связей, строительство нового автодорожного и железнодорожного обходов города Казани, а также строительство стратегического моста через реку Волгу в районе деревни Гребени. Строительство моста позволит активнее вовлечь Верхнеуслонский муниципальный район в агломерационные процессы, увеличив транспортную доступность, сохраняя при этом экосистему данной территории. Анализ транспортной доступности поселений-спутников Казанской агломерации показал, что в настоящее время больше половины Верхнеуслонского муниципального района находится за пределами часовой доступности относительно города-ядра агломерации ГО Казань.

Таким образом, общими чертами поселений городского типа Казанской агломерации являются: 1) прибрежное расположение; 2) наличие пояса лесного массива; 3) наличие пояса из сельских населенных пунктов; 4) значительный процент индивидуальной и среднеэтажной жилой застройки. Общими проблемами зон с индивидуальной застройкой внутри поселений городского типа являются однообразие, монотонность планировочной структуры, недостаток благоустроенных территорий, автоориентированность передвижений, несформированность среды для пешеходного движение, недостаток объектов обслуживания, сферы услуг в границах территорий с индивидуальной застройкой, потребность в которых обеспечивается или исключительно в центральной части городского образования, или в соседнем поселении, или в ядре агломерации. Данные проблемы характерны для всех поселений городского типа Казанской агломерации, но сильнее проявлены в пгт Васильево и пгт Нижние Вязовые. Индекс качества городской среды в г. Зеленодольск составляет 191 балл, набрано меньше половины от максимального количества баллов по параметрам: озелененные пространства, общественно-деловая инфраструктура и прилегающие пространства (данные на 2021)[9]. Индекс качества городской среды в г. Иннополис – 216 баллов. Индекс качества городской среды в г. Лаишево –163 балла.

Далее в исследовании были выделены приоритетные направления развития для каждого городского образования, которые потенциально могут стать новыми градообразующими функциями поселений-спутников Казанской агломерации.

Для *города-спутника Зеленодольск* приоритетными направлениями развития на основе уже существующих и развитых сфер были определены отрасли производства, транспорта, среднего профессионального образования, логистики. В настоящее время в производственной деятельности города задействовано 50% рабочих мест, а на два главных градообразующих предприятия АО «Зеленодольский завод им. Горького» и АО «Производственное объединение «Завод имени Серго» (POZIS) приходится 2/3 от общей отгрузки товаров собственного производства, в них трудятся более 25% работников от общей численности занятых на крупных и средних предприятиях[10]. Также необходима модернизация производств для сокращения санитарно-защитных зон, уменьшения вредных выбросов, вынос части производств и коммунально-складских предприятий с прибрежной территории «нижней» промышленной зоны. Город встроен в систему железнодорожного и автотранспортного сообщения. Есть железнодорожный вокзал и два автовокзала. Местная производственная база судостроения и выход к воде создают потенциал для организации и развития водного транспорта, который на сегодняшний день практически не развит, за исключением небольшого количества грузоперевозок предприятиями, расположенными на прибрежной территории, а также паромной

[9] Максимальный балл 360. Индекс качества городской среды Казань – 204 балла (данные на 2021). https://индекс-городов.рф/#/

[10] По данным Стратегии социально-экономического развития Зеленодольского муниципального района на 2016-2021 годы и на плановый период до 2030 года – документы доступны на сайте федеральной государственной информационной системы территориального планирования https://fgistp.economy.gov.ru/

переправы речного флота Зеленодольск – Нижние Вязовые. Предполагается активизации использования железнодорожного сообщения с г. Казанью и соответственно снижения нагрузки на автомобильные трассы (Горьковское шоссе) после запуска внутригородского кольцевого железнодорожного движения в Казани. Одним из основных векторов развития г. Зеленодольск может стать образовательная сфера, сфокусированная на оказании услуг среднего профессионального образования. Так, город сможет обслуживать близлежащие поселения, а также граничащие соседние республики. Новым градообразующим направлением может стать сфера логистики, активно развивающаяся в последние годы в Зеленодольском муниципальном районе. В настоящее время на промплощадке «Зеленодольск» (которая удалена от пгт Васильево и г. Зеленодольска на 14 и 18 км соответственно), где расположены логистические центры Ozon, Wildberries, «Пятерочка» по данным муниципальной администрации занято 8 тыс. человек. Дополнительным направлением в развитии города является более активное использование береговых зон для создания рекреационных объектов.

Таким образом, город Зеленодольск – центр «Зеленодольского кластера» в структуре Казанской агломерации должен развиваться как многоотраслевое городское образование, центр транспортно-коммуникационного развития, логистической сферы, среднего профессионального образования. Для развития города-спутника Зеленодольск предлагаются планировочно-структурные изменения: реорганизация береговых территорий и формирование третьего планировочного района «Прибрежный», создание «студенческого городка» среднего профессионального образования, реализация потенциала водных сообщений и строительство речного вокзала.

В качестве приоритетных направлений развития для пгт Васильево предлагается развитие и закрепление роли санаторно-курортного центра агломерации с формированием новых, дополняющих существующие, объектов лечебно-реабилитационных учреждений. –Также предлагается градостроительная реконструкция центральной зоны, части прибрежных территорий; модернизация производственных и коммунально-складских территорий береговой зоны, вынос части объектов, сокращение санитарно-защитных зон, уменьшение факторов негативного воздействия на окружающую среду, использование оставшихся от производства железнодорожных путей, в качестве сообщений, между лечебно-профилактическими и санаторно-курортными объектами, расположенные в разных частях поселения; организации благоустроенных территорий рекреационного назначения, связанных системой безопасных маршрутов; строительство речного причала; формирование обслуживающих функций на первых этажах многоквартирной застройки.

Приоритетные направления развития пгт Нижние Вязовые включают полноценный запуск Свияжского мультимодального логистического центра, а также развитие сельскохозяйственной деятельности. Для формирования кадров, имеющих квалификацию в работе в логистической сфере, проектным предложением предусматривается формирование в Зеленодольске образовательного центра, включающего также курсы по возможности перепрофилирования профессиональной деятельности.

Приоритетные направления развития г. Иннополис включают дальнейшее развитие инновационной и образовательной деятельности..

Приоритетными направлениями развития г. Лаишево могут стать сферы, тесно связанные с одним из главных конкурентных преимуществ поселения, его природно-территориальным комплексом – формирование комплекса рекреационных объектов, направленных на отдых, развлечение и оздоровление. Это потребует решения вопросов организации и распределения возросших нагрузок на транспортную систему, ввиду увеличения числа приезжих гостей выходного дня. У поселения есть ресурсы и потенциал для создания крупного рыбного хозяйства, развития объектов социальной направленности республиканского значения, создания на базе Лаишевского технико-экономического техникума, отделения по подготовке специалистов в сфере услуг, рекреационной отрасли.

Таким образом, наиболее значимым с позиции формирования узла-противовеса для города-ядра Казани является восточное направление – г. Зеленодольск в увязке с

поселками Васильево и Нижние Вязовые. Возможно появление узла подобного типа и в южном направлении в Лаишевском районе при развитии проекта «Смарт-сити» образовательного и научного профиля (пока это проектные разработки на уровне Республики Татарстан). Город Иннополис по существующей стратегии его развития, при оптимистичном сценарии, привлечет скорее научные кадры республики и соседних регионов, нежели создаст большой отток населения из Казани. Формирование мест приложения труда, общественных объектов периодического обслуживания в г. Лаишево и Лаишевском муниципальном районе позволят сдержать отток жителей из города и соседних сельских поселений.

Скоординированное агломерационное развитие территорий позволит перейти к более устойчивой модели территориального развития, в которой более четко проявится ресурсная специфика и функциональная роль муниципального образования, уточнится стратегия их развития. Данный вариант позволит решить существующие проблемы путем:

– снижения транспортной нагрузки на дорожную, железнодорожную сеть, за счет рассредоточения объектов;

– сокращения маятниковой миграции;

– повышения уровня жизни, обеспеченности культурно-бытовыми, социальными объектами, за счет общего увеличения уровня развития поселения;

– улучшения экологической ситуации;

– возможности воплощения комплексных проектов, направленных на усиление роста социально-экономических показателей агломерации и региона.

Результаты исследования показывают, что Зеленодольский узел (г. Зеленодольск в увязке с поселками Васильево и Нижние Вязовые) имеет потенциал и ресурсы для создания территориального противовеса ядру агломерации г. Казани.

Намерения об активном территориальном развитии в западном (Зеленодольском) направлении высказывались представителями муниципального управления с 2008 г. Концепция идеи «Большой Зеленодольск» была разработана ТИГП «Татинвестгражданпроект», но широкого общественного обсуждения, распространения, открытого доступа и дальнейшей проработки не получила. Проектная деятельность и финансирование территориальных преобразований в период с 2008-2018 гг. в основном были направлены на ядро агломерации – г. Казань, столицу Республики Татарстан. Ряд федеральных (меры по поддержке моногородов, федеральный проект «Формирование комфортной городской среды») и республиканских программ («Год парков и скверов» / 2015 г., «Год водоохранных зон» / 2016 г.) немного сместили внимание с городов-миллионеров на малые и средние поселения. В 2019 г. после смены руководства Зеленодольского муниципального района, концепцию «Большой Зеленодольск» решили возродить. Основа концепции «Большого Зеленодольска» – строительство жилых массивов вдоль оси трассы «Казань – Зеленодольск» для реализации национальных целей в сфере жилищного строительства и инфраструктурного развития регионов. По данным СМИ, опубликовавших концепцию, до 2030 года планируется ввести в эксплуатацию 5,7 млн. кв. метров жилья для 182,6 тыс. человек (для сравнения, на 2021 г. численность населения всего Зеленодольского муниципального района составляет 165 592 человек). Также по информации в местных СМИ планируется строительство объектов социальной, инженерной инфраструктуры, мест приложения труда. Возможное усугубление транспортных проблем разработчики концепции «Большого Зеленодольска» предполагают решать строительством дороги-дублера, также рассматривается создание линии метробуса и пуск электрички по железнодорожной ветке, которая задействует существующие пути и техническую линию северо-западного направления. Такое намерение о «линейно-ковровой» застройке вызывает угрозу сокращения природных зон, ухудшения экологического состояния территории, рационального землепользования, транспортных перегрузок. По оценкам экологов, проект создает угрозу деградации Волжско-Камского биосферного заповедника, который расположен на территории Зеленодольского муниципального района.

Таким образом, можно отметить, что авторское исследование и проект «Большой Зеленодольск» сходятся в тезисе географического направления развития Казанской

агломерации в западном направлении. Авторское исследование построено на следующих ключевых положениях:

1) Необходимо усиливать и развивать уже существующие поселения городского типа в Зеленодольском муниципальном районе (Зеленодольск, Васильево, Нижние Вязовые), что позволит создавать в них более крупные и разнообразные объекты обслуживания, а не ограничиваться первичной социальной инфраструктурой. В целом это можно описать как принцип концентрации застройки, функций, в том числе жилой, мест приложения труда, людей.
2) Необходимо расширять линейку мест приложения труда в сфере услуг, обслуживания, а не ограничиваться формированием промышленных площадок на территории района.
3) В пространственное развитие муниципальных образований необходимо активно вовлекать ресурс большой акватории.
4) Необходимо более активное использование ресурса пригородного железнодорожного сообщения в западном направлении, в совокупности с разработкой и запуском внутреннего железнодорожного кольца в г. Казани.

В дальнейшем исследование предполагает выявление приемов и принципов градостроительного развития городов-спутников Казанской агломерации, разработку пространственных стратегий развития городов-спутников. Также отдельное направление пространственного развития Казанской агломерации – это изучение «стыковых узлов» на границе ядра (Казани) и ближнего агломерационного пояса (поселения на территории примыкающих административных районов). В совокупности это позволит сформировать модель пространственного развития Казанской агломерации до 2035 г.

4. Заключение

1) В исследовании были выявлены особенности поселений городского типа Казанской агломерации. Рассмотрены общие демографические характеристики поселений городского типа в агломерационном поясе Казанской агломерации, особенности пространственно-территориального развития, уровень жизни в поселениях городского типа, также дана характеристика градообразующей базы поселений.

2) На основе комплексного анализа в исследовании выявлены приоритетные направления пространственно-территориального развития для каждого городского образования. Выявлены предпосылки к развитию «Зеленодольского кластера» (Зеленодольск, Васильево, Нижние Вязовые), который может стать узлом-противовесом главному агломерационному ядру (Казань).

Список литературы / References

1. Лаппо Г. М. Городские агломерации СССР – России: особенности динамики в XX веке // Удобное пространство для города. 2007. № 4–5. С. 6–9. [Lappo G. M. Urban agglomerations of the USSR - Russia: features of dynamics in the 20th century // Comfortable space for the city. 2007. № 4–5. P. 6–9.]
2. Закиева Л. Ф., Гарифуллина А. Р. Функционально-планировочное развитие Восточного сектора Казанской агломерации: Материалы 12-й Международной молодежной научной конференции – Молодежь и XXI век / Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. С. 235–238. [Zakieva L. F., Gariffulina A. R. Functional and planning development of the Eastern sector of the Kazan agglomeration: Materials of the 12th International Youth Scientific Conference Youth and the XXI Century / Kursk: Southwest State University, 2022. P. 235–238.]
3. Закирова Ю. А., Исмагилова С. Х., Закиева Л.Ф. Функционально-пространственная организация стыковых узлов в планировочной структуре Казанской агломерации // Архитектура и строительство России. 2022. № 2(242). С. 44-49. [Закирова Zakirova Yu. A., Ismagilova S.H., Zakieva L. F. Functional and spatial organization of joint nodes in the planning structure of the Kazan agglomeration // Architecture and Construction of Russia. 2022. № 2(242). P. 44-49.]
4. Хакимова Т. С. Соотношение стратегии пространственного и социально-экономического развития муниципального образования // Архитектон: известия вузов. 2018. № 2 (62). С. 281–289. [Khakimova T. S.Correlation between municipal spatial

development and socio-economic development strategies// Architecton: Proceedings of Higher Education. 2018. № 2 (62). P. 281–289.]
5. Перцик Е. Н. География городов (Геоурбанистика). М.: Высшая школа, 1991. 282 с. [Pertsik E.N. The urban geography (geourbanistics). M.: Vysshaya shkola. 1991. 282 p.]
6. Любовный В. Я. Городские агломерации России: от стихийного к целенаправленному развитию // Муниципалитет: экономика и управление. 2015. № 10. [Lyubovnyj V.Ya. Urban agglomerations of Russia: from natural to targeted development // Municipalitet: ekonomika i upravlenie. 2015. № 10.]
7. Кузнецова О.В. Городские агломерации и СПР // Регионалистика. 2020. Т. 7. № 3. С. 67–70. DOI: 10.14530/reg.2020.3.67.[KuznetsovaO. V. Theurbanagglomerationsandthespatialdevelopmentstrategy // Regionalistica. 2020. Vol. 7. № 3. P. 67–70.]
8. Киселева Н. Н., Митрофанова И. В., Колоскова А. А. Городская агломерация как фактор устойчивого развития городов-спутников (на примере Ростовской области) // Региональная экономика. Юг России. 2021. Т. 9. № 3. С. 113–122. DOI: 10.15688/re.volsu.2021.3.10.[Kiseleva N.N., Mitrofanova I.V., Koloskova A. A. Urban Agglomeration As a Factor of Sustainable Development of Satellite Cities (On the Example of Rostov Region) // Regionalnaya ekonomika. Yug Rossii [Regional Economy. South of Russia]. 2021. Vol. 9. №. 3. P. 113-122. (in Russian)]
9. Симагин Ю. А. Социально-экономическое значение поселков городского типа в регионах России // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2009. № 20. С. 50–55. [Simagin Yu. A. Socio-economic significance of urban-type settlements in the regions of Russia // National Interests: Priorities and Security. 2009. № 20. P. 50–55.]
10. Rastvortseva, S. Agglomeration economics in regions: The case in the Russian industry // Regional Science Inquiry, 2017. № 9(2), P. 45–54.
11. Попов Р. А., Пузанов А. С., Полиди Т. Д. Контуры новой государственной политики по отношению к городам и городским агломерациям России // Всероссийский экономический журнал ЭКО. 2018. №. 8 (530). С. 7–22. [Popov R. A., Puzanov A. S., Polidi T. D. The outline of the new state policy towards Russian cities and urban agglomerations // ECO. 2018. №. 8 (530). P. 7–22.]
12. Пузанов А. С., Попов Р. А.Отражение вопросов развития городских агломераций в документах стратегического планирования и программных документах регионального и межмуниципального уровня. Часть 1 // Муниципальное имущество: экономика, право, управление. 2019. № 1. С. 21–26.[Puzanov A. S., Popov R. A. Reflection of city agglomeration development issues in strategic planning documents and regional and inter-municipal program documents. Part 1// Munitsipal′noye imushchestvo: ekonomika, pravo, upravleniye. 2019. № 1. P. 21–26.]
13. Пузанов А. С., Попов Р. А. Отражение вопросов развития городских агломераций в документах стратегического планирования и программных документах регионального и межмуниципального уровней. Часть 2 // Муниципальноеимущество: экономика, право, управление. 2019. № 2. С. 28–31. [Puzanov A. S., Popov R. A. Reflection of city agglomeration development issues in strategic planning documents and regional and inter-municipal program documents. Part 2 // Munitsipal′noye imushchestvo: ekonomika, pravo, upravleniye. 2019. № 2. P. 28–31.]
14. Андреева Ю. В. Градостроительные подходы и приемы пространственного развития структурных элементов Ростовской и Краснодарской городских агломераций // AMIT. 2017. №2 (39). С. 284–296. [Andreeva J. Town-planning approaches and methods of spatial development of structural elements of Rostov and Krasnodar urban agglomerations // AMIT. 2017. №2 (39).P. 284–296.]
15. Астафьева Н. С., Лагута И. В., Кукарина Е. Е., Молева Н. Ю. Проблемы роста и развития мировых и российских агломераций // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10. №1. С. 157–163. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.01.20[Astafeva N. S., Laguta I. V., Kukarina E. E., Moleva N. Yu. Problems of growth and development of world and Russian agglomeration. Gradostroitel’stvo i arhitektura // Urban Construction and Architecture. 2020. Vol. 10. № 1. P. 157–163. (in Russian) DOI:

10.17673/Vestnik.2020.01.20. Smirnyagin L.V. Agglomeration: pros and cons // GorodskoyAlmanakh. 2008. Vol. 3. P. 162–174.]
16. Rastvortseva S. N. An Overview of Investigations Concerning Agglomerations in Regional Economy // Ekonomika regiona [Economy of regions], 2022, 18(2).P. 324-337. DOI:10.17059/ekon.reg.2022-2-2.
17. Lavrinenko P. A., Romashina A. A., Mikhailova T. N, Chistyakov P. A. Agglomeration effect as a tool of regional development // Studies on Russian Economic Development, 2019. Vol. 30, № 3, P. 268-274. DOI: 10.1134/S1075700719030109.
18. Zakirova Yu., Latypova M., Gafurova S. The concept of creating a form-based code of Zelenodolsk // E3S Web of Conferences Volume 274 (2021): 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021), Kazan, 21–28 апреля 2021 года. – France: EDP Sciences, 2021. P. 1021. DOI: 10.1051/e3sconf/202127401021.
19. Закирова Ю. А. Трансформация планировочной структуры индустриальных городов Республики Татарстан: Сборник докладов XIV Международной конференции «Российские регионы в фокусе перемен», Екатеринбург, 14–16 ноября 2019 года. – Екатеринбург: ООО «Издательство УМЦ УПИ», 2020. С. 591–593. [Zakirova Yu. A. Transformation of planning structure industrial cities of the republic of Tatarstan: Collection of reports of the XIV International Conference «Russian Regions in the focus of change», Yekaterinburg, November 14-16, 2019. – Yekaterinburg: OOO «Izdatel′stvo UMTS UPI», 2020. P. 591–593.]

Информация об авторах.

Юлия Александровна Закирова, кандидат архитектуры, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
E-mail: jzakirova@gmail.com
Адель Ринатович Сагдиев, специалист, ГБУ «Фонд пространственных данных Республики Татарстан», г. Казань, Российская Федерация
E-mail: adel.sagdiev.95@mail.ru

Information about the authors.

Yuliya A. Zakirova, candidate of architecture, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
E-mail: jzakirova@gmail.com
Adel R. Sagdiev, specialist, GBU «Fond prostranstvennykh dannykh Respubliki Tatarstan», Kazan, Russian Federation
E-mail: adel.sagdiev.95@mail.ru

УДК: 712
DOI: 10.52409/20731523_2022_3_147
EDN: ZYYGWU

Архитектура зрелищных сооружений в исторических садах Казани на период второй половины XIX – начала XX вв.

А.Р. Минибаева[1], М.Ш. Фазлеев[1]
[1]Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* В настоящее время для города Казани актуальна тема создания и возрождения общественных городских пространств, что требует обращения к историческому опыту их проектирования и застройки. Цель исследования заключается в выявлении архитектуры сооружений зрелищного назначения в садах Казани на период второй половины XIX – начала XX вв. Задачами работы являются изучение библиографических, иконографических и архивных материалов по теме исследования; выявление типологии и проведение архитектурного анализа зрелищных сооружений, расположенных на территориях садов Казани на период второй половины XIX – начала XX вв.
Результаты. Изучение архитектуры сооружений зрелищного назначения, расположенных на территориях городских садов Казани на период второй половины XIX – начала XX вв., позволило выявить основные типы сооружений – театры, открытые сцены, эстрады, воксалы; архитектурно-планировочные, конструктивные и стилистические решения, а также социальные и природно-климатические предпосылки их возникновения и развития.
Выводы. Результаты исследования могут быть полезны при реставрации, проектировании и воссоздании общественных объектов на территории исторического центра города Казани и других исторических поселений, а также в курсе лекций по истории архитектуры в строительных и архитектурных учебных заведениях Казани и городов Поволжья.

Ключевые слова: зрелищные сооружения, архитектура зданий и сооружений в исторических садах Казани, эстрада, открытая сцена, театр.

Для цитирования: Минибаева А.Р., Фазлеев М.Ш. Архитектура зрелищных сооружений в исторических садах Казани на период второй половины XIX – начала XX вв. // Известия КГАСУ 2022 № 3 (61), с.147-157, DOI: 10.52409/20731523_2022_3_147, EDN: ZYYGWU

Architecture of spectacular buildings in the historical gardens of Kazan for the period of the second half of the XIX – early XX centuries

A.R.Minibaeva[1] , M.Sh. Fazleev[1]
[1]Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract. *Problem statement.* Currently, the creation and revival of public urban spaces is an urgent topic in Kazan, in other wordsvarious national, federal, state programs and projects are in operation, investors are attracted. For this reason, there is a need to turn to historical experience in order to revive the structures located on the territories of public urban spaces.
The purpose of the study is to identify the architecture of entertainment structures in the gardens of Kazan for the period of the second half of the XIX – early XX centuries. The objectives of the study include:
-study of bibliographic, iconographic and archival materials related to the research topic;
-identification of typology and architectural analysis of spectacular structures located on the territories of Kazan gardens for the period of the second half of the XIX – early XX centuries.
Results. As a result of the study of the architecture of entertainment structures located on the territories of Kazan city gardens for the period of the second half of the XIX – early XX centuries, the following were identified:
-the main types of structures are theaters, outdoor stages, bandstands, voxals.
-architectural solutions, in other words structures of spectacular purpose were 1-2-storey symmetrical structures made of wood. The prevailing trend of architectural style is eclecticism. They were the dominant objects in the planning structure of the garden.
Also in this study, the prerequisites for the appearance of entertainment facilities in the city gardens of Kazan are considered.
Conclusions. The results of the research can be used in the restoration, design and reconstruction of public facilities on the territory of the historical center of Kazan and other historical settlements, as well as in a course of lectures on the history of architecture in construction and architectural educational institutions of Kazan and Volga region cities.

Keywords: spectacular buildings, architecture of buildings and structures in the historical gardens of Kazan, estrade, open stage, theater.

For citation: Minibaeva A.R., Fazleev M.Sh. Architecture of spectacular buildings in the historical gardens of Kazan for the period of the second half of the XIX – early XX centuries // News KSUAE 2022 №3 (61), p. 147-157, DOI: 10.52409/20731523_2022_3_147, EDN: ZYYGWU

1. Введение

Основными объектами в городских садах Казани на период второй половины XIX – начала XX вв. являлись зрелищные сооружения, такие как летние театры, всесезонные театры, открытые сцены, эстрады и воксалы (ист. увеселительно-развлекательные заведения) [1]. На сценах садов Казани выступали как известные артисты императорских театров, так и любители. Например, на летней эстраде Панаевского сада, где ставились вечерние спектакли любителей, дебютировал Федор Шаляпин. На представлениях в садах Казани бывал и Максим Горький, в своих воспоминаниях он писал о выступлении в летних театрах известных актеров того периода – В. Н. Андреева-Бурлака и А. Я. Гламы-Мещерской [2].

Со времен Екатерины II, с XVIII в., «зрелищем» назывались все театрализованные представления, спектакли и концерты [3].

Во второй половине XIX в. «зрелища» развиваются и делятся на отдельные направления – театральные представления, оперу, балет и т.д. С делением зрелищ на

отдельные направления появляется необходимость в устройстве зданий и сооружений, соответствующих определенным требованиям [3].

Также на развитие зрелищных сооружений в данный период повлияли арендные отношения в области городских садов Казани, где территория под строительство зданий и сооружений сдавалась в аренду на определенный срок. По этой причине зрелищные сооружения представляли собой быстровозводимые, некапитальные, временные строения, рассчитанные на срок аренды [4].

В течение XX в., в связи со сменой идеологии Российского государства, зрелищные сооружения практически не использовались, по этой причине они ветшали и разрушались [5].

В настоящее время для города Казани является актуальной тема создания и возрождения общественных городских пространств. Такие проекты поддерживаются в рамках национальных, федеральных, государственных программ, для их реализации привлекаются инвесторы [6-8]. По этой причине возникает необходимость в обращении к историческому опыту с целью возрождения сооружений, располагавшихся на территориях общественных городских пространств [9-12].

В исследованиях Жаржевского Л.М., Дубина, А. С., Газизовой Е., Новиковой М., Рощектаева А. и д.р. поднимаются вопросы, связанные с городскими садами Казани и архитектурными сооружениями на их территориях, в том числе зрелищными сооружениями [13,14].

В трудах XIX – XX вв. таких авторов как Дульский П.М., Катанов Н.Ф., Пинегин М.Н., Загоскин Н.П., Турнерелли Э.П., Надырова Х.Г. и д.р. наиболее полно отражена история Казанского Края, в том числе история городских садов Казани и зданий и сооружений на их территориях [15-19].

Однако следует отметить, что зрелищные сооружения на территориях исторических городских садов Казани на период середины XIX – начала XX вв. в этих исследованиях были изучены недостаточно.

Интерес к садам и зрелищным сооружениям на их территориях прослеживается и в зарубежных исследованиях [20-22]. Особое внимание уделяется вопросам сохранения, приспособления и модернизации исторических садов, в частности такими исследователями как Rafaelde Brito Sousa, Raheleh Rostami PhD, Hasanuddin Lamit PhD, Anna Jakobsson, Valerie Dewaelheyns, Ahmad Zamil Zakaria, Ismail Hafiz Salleh и другими [23-27].

В Национальном Архиве Республики Татарстан (НАРТ) имеется значительное количество ранее не опубликованных документов на тему городских садов Казани на период второй половины XIX – начала XX вв., которые могут послужить основой для изучения данного актуального вопроса.

Цель исследования заключается в выявлении архитектуры зрелищных сооружений, расположенных на территориях городских садов Казани на период второй половины XIX – начала XX вв.

Перечень задач, намеченных к решению:

-изучить библиографические, иконографические и архивные материалы по теме исследования;

-выявить типологию и провести архитектурный анализ зрелищных сооружений, расположенных на территориях садов Казани на период второй половины XIX – начала XX вв.

2. Материалы и методы

Материалы исследования в настоящей работе включают архивные документы, хранящиеся в Национальном архиве Республики Татарстан (НАРТ); литературные источники Национальной библиотеки Республики Татарстан и библиотеки Казанского государственного архитектурно-строительного университета; издания в области истории и архитектуры г. Казани, опубликованные до середины XX в.

Метод исследования основывается на комплексном подходе, включающем изучение, сопоставление и анализ архивных, письменных, библиографических и графических материалов.

В процессе исследования были выполнены графические реконструкции зданий и сооружений согласно материалам НАРТ.

При выявлении сооружений зрелищного назначения были изучены исторические сады Казани [2, 4, 13-16, 18, 19]: Сад Аркадия, Банноозерский сад, Державинский сад, Износковский сад / сад Николаи / сад Эрмитаж, Лобачевского сквер, Сад Лецкого / Лядской сад, Мокринский садик, Николаевский сквер, Панаевский сад, Сад Русская Швейцария, Триволи сад / Андреевский сад / Дудоровский сад, Театральный сад, Фуксовский сад, Юнусовский сад, Черноозерский сад.

На территориях городских садов Казани в исследуемый период были расположены следующие здания и сооружения зрелищного назначения [2, 4, 13-16, 29-33] (рис. 1):

– сад Аркадия:

Театр построен в период с 1895 г. по 1905 г., площадь застройки составляла 200 кв. саж. Комбинация строительных материалов и конструкций – деревянный каркас, перекрытия из дерева. Расположен в центральной части сада. По конструктивному решению сооружение быстровозводимое, многосезонное.

Открытая сцена построена в период с 1895 г. по 1905 г., в 1906 г. к сооружению были пристроены навес и хозяйственные постройки. Комбинация строительных материалов и конструкций – деревянный каркас, перекрытия из дерева. Объемно-планировочная структура зальная. Этажность – 1 этаж. Стилевое направление – эклектика. Сцена расположена в центральной части сада. По конструктивному решению сооружение быстровозводимое, многосезонное.

– Панаевский сад:

Летний театр построен в 1887 г., утрачен в 1924 г. Площадь застройки составляла 185 кв. саж. Комбинация строительных материалов и конструкций – деревянный каркас, перекрытия из дерева. Объемно-планировочная структура коридорно-кольцевая. Этажность – 2 этажа. Стилевое направление – эклектика. Расположен в центральной части сада. По конструктивному решению сооружение быстровозводимое, многосезонное.

Эстрада 1 построена в 1888г., утрачена в 1920-е г. Площадь застройки составляла 10 кв. саж. Комбинация строительных материалов и конструкций – деревянный каркас, перекрытия из дерева. Объемно-планировочная структура зальная. Этажность – 1 этаж. Стилевое направление – эклектика. Расположена в центральной части сада. По конструктивному решению сооружение быстровозводимое, облегченное, сезонное.

Эстрада 2 построена в 1895г. Площадь застройки составляла 15 кв. саж. Комбинация строительных материалов и конструкций – деревянный каркас, перекрытия из дерева. Объемно-планировочная структура зальная. Этажность – 1 этаж. Стилевое направление – эклектика. Расположена в центральной части сада. По конструктивному решению сооружение быстровозводимое, облегченное, сезонное.

Открытая сцена построена в 1888г., утрачена в 1920-е г. Площадь застройки составляла 28 кв. саж. Комбинация строительных материалов и конструкций – деревянный каркас, перекрытия из дерева. Объемно-планировочная структура павильонная. Этажность – 1 этаж. Стилевое направление – эклектика, присутствуют мотивы русского деревянного зодчества. Расположена в удалении от центральной части сада. По конструктивному решению сооружение быстровозводимое, многосезонное.

-сад Русская Швейцария:

Театр построен в 1909 г. Комбинация строительных материалов и конструкций – деревянный каркас. Этажность – 2 этажа. Стилевое направление – модерн. По конструктивному решению сооружение быстровозводимое, многосезонное.

Эстрада построена в конце XIX в. Комбинация строительных материалов и конструкций – деревянный каркас. Объемно-планировочная структура зальная. Этажность – 1 этаж. Основное стилевое направление – эклектика. По конструктивному решению сооружение быстровозводимое, облегченное, сезонное.

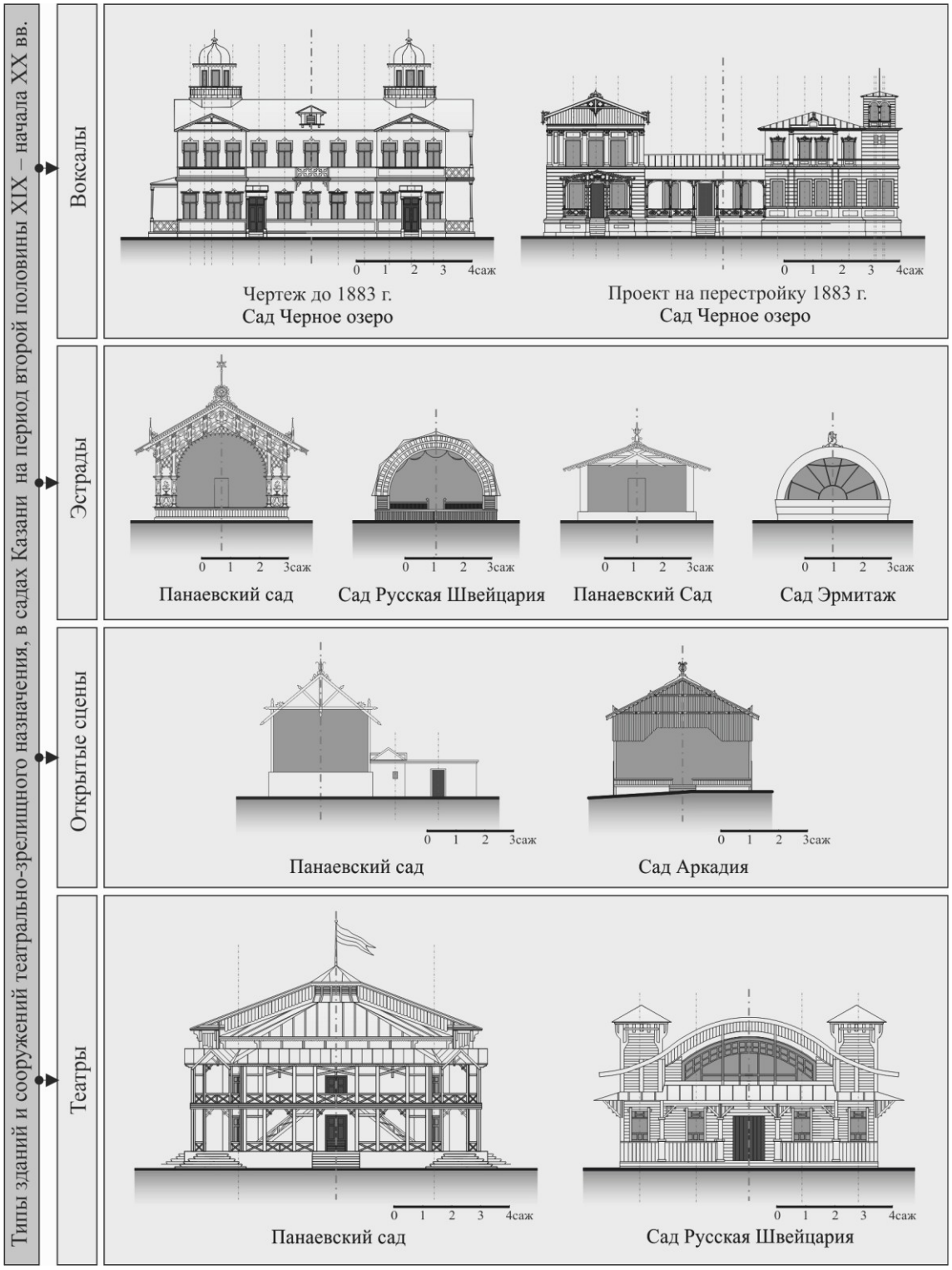


Рис.1. Типы зданий и сооружений театрально-зрелищного назначения в общественных городских садах Казани на период второй половины XIX – начала XX вв.
Fig.1. Types of buildings and structures for theatrical and entertainment purposes in public urban gardens of Kazan for the period of the second half of the XIX - early XX centuries.
(Графическая реконструкция. Источники: НАРТ, https://pastvu.com)
(Graphic reconstruction. Sources: NART, https://pastvu.com).

–сад Эрмитаж / Износковский сад / сад Николаи /:

Эстрада. Площадь застройки составляла 10 кв. саж. Комбинация строительных материалов и конструкций – деревянный каркас. Объемно-планировочная структура зальная. Этажность – 1 этаж. Стилевое направление – эклектика с преобладающими

элементами классицизма. Расположена в центральной части сада. По конструктивному решению сооружение быстровозводимое, облегченное, сезонное.

– Черноозерский сад:

Воксал 1 (ист. здание увеселительного назначения со сценой) построен до 1883г. Площадь застройки составляла 92 кв. саж. Комбинация строительных материалов и конструкций – деревянный каркас, перекрытия из дерева. Объемно-планировочная структура павильонная. Этажность – 2 этажа. В стилевом направлении преобладают мавританские мотивы. Расположен в центральной части сада. По конструктивному решению сооружение быстровозводимое, всесезонное.

Воксал 2 перестроен в 1883г. из предыдущего здания воксала, утрачен вначале XX в. Площадь застройки составляла 92 кв. саж. Комбинация строительных материалов и конструкций – деревянный каркас, перекрытия из дерева. Объемно-планировочная структура зальная. Этажность – 2 этажа. Стилевое направление – эклектика. Расположен в центральной части сада. По конструктивному решению сооружение быстровозводимое, всесезонное.

3. Результаты и обсуждение

На территориях общественных городских садов Казани на период второй половины XIX – начала XX вв. располагались следующие типы сооружений зрелищного назначения – театры, открытые сцены, эстрады и воксалы. Данные сооружения были расположены в следующих садах (рис. 1):

- сад Аркадия – театр, открытая сцена с навесом;
- сад Эрмитаж / Износковский сад / сад Николаи – эстрада;
- Панаевский сад – летний театр, 2 эстрады, открытая сцена;
- сад Русская Швейцария – театр, эстрада;
- Черноозерский сад – воксал.

Анализ архитектуры сооружений зрелищного назначения в общественных городских садах Казани на период второй половины XIX – начала XX вв. позволил выявить следующее (рис. 1, 2):

- в большинстве случаев сооружения зрелищного назначения являлись акцентными и доминирующими объектами в планировочной структуре сада;
- основное развитие сооружений зрелищного назначения в общественных городских садах приходится на вторую половину XIX в.;
- фасады театров, эстрад и открытых сцен симметричны по отношению к центральной оси, асимметричные решения встречаются редко;
- распространенной формой эстрад является форма, напоминающая ракушку;
- здания театров представляют собой двухэтажные строения с коридорно-кольцевой планировочной структурой;
- открытые сцены представляют собой одноэтажные сооружения с павильонной и зальной планировочными структурами;
- форма сооружений зрелищного назначения образована как простыми, так и сложными геометрическими фигурами;
- воксалы представляют собой двухэтажные ассиметричные строения, с павильонной планировочной структурой, включающей сцену, ресторан и помещения хозяйственного назначения;
- комбинации строительных материалов и конструкций представляют собой деревянный каркас и перекрытия из дерева, строения из кирпича и природного камня отсутствуют;
- здания и сооружения зрелищного назначения по конструктивному решению легковозводимые каркасные конструкции как всесезонного, так и временного назначения;
- в архитектурно-стилистическом оформлении сооружений зрелищного назначения преобладает архитектурный стиль – эклектика, встречаются направления стилей русское деревянное зодчество, мавританские мотивы и модерн.

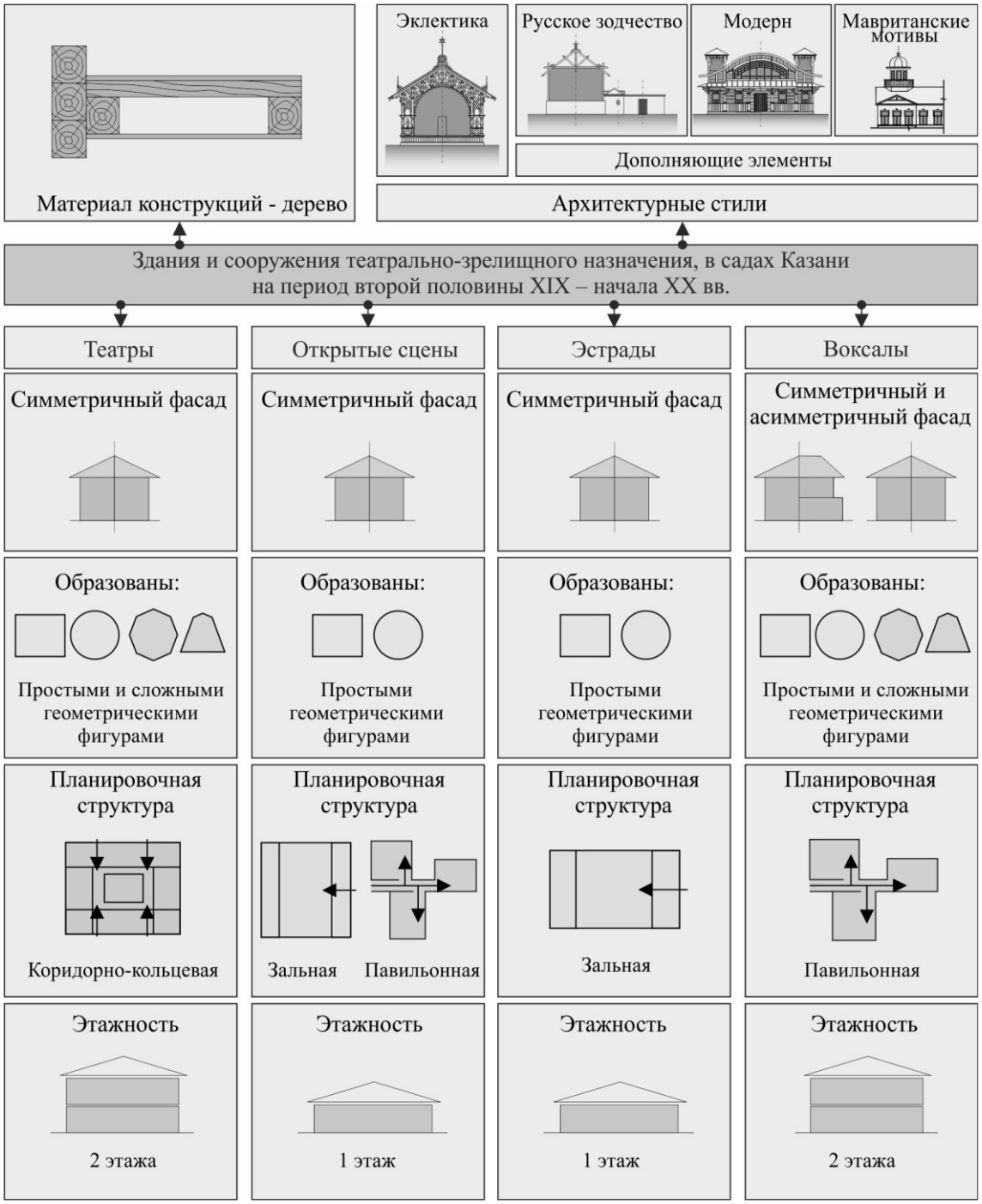


Рис.2. Архитектурный анализтипов сооружений зрелищного назначения в городских садах Казани на период второй половины XIX–началаXX вв.
Fig.2. Architectural analysis of types of entertainment structures in Kazan city gardens for the period of the second half of the XIX – early XX centuries.
Материал авторов (Authors' material).

После посещения Казани Императрицей Екатериной II, во второй половине XVIII в., широкое распространение получают театры, сначала монументальные, затем сезонные [16].

Императрица Екатерина II придавала театру важное общественно-воспитательное и культурно-просветительское значение. Во время пребывания в Казани она поручила возобновить в гимназиях театральные представления, которые ранее были прекращены, и склонять к этому местное дворянство. Согласно желанию Екатерины II, в гимназических спектаклях стали принимать участие лица из знатных фамилий города [16].

Непосредственно в садах Казани театры получают распространение во второй половине XIX в., после пожара в театре на месте Державинского сада в 1842 г. Так как местным труппам требовалось здание для театральной деятельности, а в центральной части города свободные здания отсутствовали, было решено возводить их в садах. Они возводятся в саду Аркадия, Панаевском саду, саду Эрмитаж, Черноозерском саду и в саду Русская Швейцария. Театры в садах Казани становятся излюбленным местом посетителей, в связи с чем, они продолжают функционировать и после восстановления главного городского театра [14-16].

В начале XIX в. в Казани появляются оркестры, а в конце XIX получает широкое распространение Русская опера. Развитие оркестров и оперы способствует появлению открытых летних эстрад и сцен на территориях садов [16].

Конструктивные особенности зданий и сооружений театрально-зрелищного назначения были обусловлены природно-климатическими особенностями местности:

- для Казанского ландшафта характерна овражная структура. Особенности рельефа обусловили возведение временных, сезонных, легковозводимых каркасных конструкций [14,16];
- наличие обширных лесов на территории Казанского Края повлияло на выбор строительного материала, т.е. строения в большинстве случаев выполнены из дерева [17];
- для Казани характерны холодная зима и жаркое лето, что обусловило появление как утепленных зданий и сооружений, предназначенных для обогрева посетителей, так и легких навесов, способных укрыть от солнца [19].

Казань всегда являлась городом с элементами влияния тюркской и исламской культуры, в связи с чем была потребность на видение и трактовку этих традиций в архитектуре общественных зданий Казани. Данное положение обусловило преобладание в облике архитектурных сооружений второй половины XIX–начала XX вв. стиля «эклектика» и присутствие мавританских мотивов.

В настоящее время, в условиях активного развития общественных городских пространств важной проблемой становится сохранение исторического центра города и возрождение объектов исторического наследия. Одним из эффективных методов решения этой проблемы является изучение исторического опыта.

Сооружения зрелищного назначения – театры, открытые сцены, эстрады и воксалы обладают значительным туристическим потенциалом и могут быть интересны не только местному населению, но и гостям города, что может служить основой для дальнейших исследований.

4. Заключение

1. Комплексный анализ архивных, библиографических и иконографических источников позволил выявить наиболее распространенные типы сооружений зрелищного назначения, располагавшихся на территориях городских садов Казани на период второй половины XIX – начала XX вв. – театры, эстрады, открытые сцены, воксалы.
2. В результате архитектурного анализа были выявлены архитектурно-планировочные, конструктивные и стилистические решения сооружений зрелищного назначения городских садов Казани на период второй половины XIX – начала XX вв. и социальные и природно-климатические предпосылки, повлиявшие на их возникновение и развитие.
3. Наибольшее развитие сооружения зрелищного назначения в общественных городских садах Казани получили во второй половине XIX вв.

Проведенная работа предлагается за основу для дальнейшего расширенного изучения архитектуры зданий и сооружений, расположенных на территориях городских садов Казани на период второй половины XIX – начала XX вв.

Материал данного исследования может иметь практическую значимость при проектировании, реставрации и восстановлении садов Казани и других исторических поселений, а также в курсе лекций по истории архитектуры в строительных и архитектурных учебных заведениях РТ и Поволжья.

Список литературы/ References

1. Айдарова Г.Н., Айдаров Р.С. Монография, Деревянные общественные здания Казани X1X - начала XX веков в акварели и графике. Издательство: Казань, 2020. 224 с. (Aidarova G.N., Aidarov R.S. Monograph, Wooden public buildings of Kazan X1X - early XX centuries in watercolors and graphics. Publisher: Kazan, 2020. 224 p.).
2. Вавиличева И.М. Панаевский театр в Казани // Министерство культуры Республики Татарстан. Национальный музей Республики Татарстан – официальный сайт. 2020. URL: https://gorkiy.tatmuseum.ru (дата обращения: 03.07.22). (Vavilicheva I.M. Panayevsky Theater in Kazan // Ministry of Culture of the Republic of Tatarstan. National Museum of the Republic of Tatarstan – official website. 2020. URL: https://gorkiy.tatmuseum.ru (accessed: 03.07.22)).
3. Развитие русского театра при Екатерине II // Культура – здесь и сейчас. 2012. URL: http://velikayakultura.ru (датаобращения: 01.07.22). (The development of the Russian theater under Catherine II // Culture – here and now. 2012. URL: http://velikayakultura.ru (accessed: 01.07.22)).
4. Об отпуске денег на содержание городских садов. 1876-1879 // НАРТ, Ф. 98. Д. 1354. Оп. 1. (About the release of money for the maintenance of urban gardens. 1876-1879 // ON RT, F. 98. D. 1354. Op. 1.).
5. Кириченко Е.И. Градостроительство России середины XIX - начала XX века: Общ. характеристика и теорет. Проблемы. Столицыипровинция. Издательство: Прогресс - Традиция, 2001. 340 с. (Kirichenko E.I. Urban planning in Russia in the mid-19th - early 20th century: Society. characteristic and theory. Problems. capitals and provinces. Publisher: Progress-Tradition, 2001. 340 p.).
6. МинистерстваРеспубликиТатарстан // Minstroy.tatarstan.ru: официальныйсайт. 2022. URL: https://minstroy.tatarstan.ru/natsionalnie-proekti.htm (дата обращения: 03.02.22). (Ministries of the Republic of Tatarstan // Minstroy.tatarstan.ru: official site. 2022. URL: https://minstroy.tatarstan.ru/natsionalnie-proekti.htm (reference date: 03.02.22)).
7. Надырова Х. Г. Хартия ИКОМОС и охранно-реставрационная деятельность вреспублике Татарстан : сб. мат. V Международной научно-практическойконференции «Культурное наследие в XXI веке: сохранение, использование,популяризация / КГАСУ. Казань, 2017. С. 201–209. (Nadyrova H. G. Charter of ICOMOS and security and restoration activities in the Republic of Tatarstan : collection of mat. V International Scientific and Practical Conference "Cultural heritage in the XXI century: preservation, use, popularization / KGASU. Kazan, 2017. pp. 201-209.).
8. Надырова Х.Г. Давосская декларация ИКОМОС 2018 г.: обновление взгляда на сохранение наследия. Изд. : Южный Федеральный ун-т, Ростов-на-Дону, Россия, 2018. С. 82-85. (Nadyrova H.G. Davos Declaration ICOMOS 2018: Updating the View on heritage preservation. Ed. : Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia, 2018. pp. 82-85.).
9. НадыроваХ.Г. ПроблемавозрожденияидентичностиархитектурыСтаро-ТатарскойслободыКазани. Изд. : Институт истории им. Шигабутдина Марджани АН РТ, Казань, 2019. С. 255-263. (Nadyrova H.G. The problem of reviving the identity of the architecture of the Old Tatar settlement of Kazan. Ed. : Institute of History. Shigabutdina Marjani of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, 2019. pp. 255-263 p.).
10. Айдарова Г. Н., Айдаров Р. С. «Старое» и «новое» в условиях сохранения и. развития исторического центра Казани: сб. ст. V междунар. науч.-практ. конф. «Культурное наследие в XXI веке: сохранение, использование, популяризация» / КГАСУ. Казань, 2017. С. 20–24. (Aidarova G. N., Aidarov R. S. "Old" and "new" in the conditions of conservation and development of the historical center of Kazan: collection of Art. V international scientific and practical conference "Cultural heritage in the XXI century: preservation, use, popularization" / KGASU. Kazan, 2017. pp. 20-24.).
11. Galina Aidarova, Elza Bashirova. Regional architecture of Russia: Kazan - conflicts of the "old" and "new" // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012016.

12. Багдасарян С.Д., Самсоненко Т.А. Государственная политика России в отношении историко-культурного наследия в практике туризма // Вестник Адыгейского государственного университета. №2. 2021. 279 с. (Bagdasaryan S.D., Samsonenko T.A. State policy of Russia in relation to historical and cultural heritage in the practice of tourism // Bulletin of the Adygea State University. No. 2. 2021. 279 p.).
13. Дубин А. Сады и парки старой Казани : на рубеже XIX-XX веков в Казани было 11 городских садов и скверов. Наиболее излюбленными из них были Николаевский сквер (Ленинский сад), Панаевский сад, Сад Эрмитаж, Лядской сад. Идель . 2015. № 7. С. 60-62. (Dubin A. Gardens and parks of old Kazan : at the turn of the XIX-XX centuries in Kazan there were 11 city gardens and squares. The most favorite of them were Nikolaevsky Square (Lenin Garden), Panayevsky Garden, Hermitage Garden, Lyadsky Garden. Idel . 2015. No. 7. pp. 60-62).
14. Жаржевский Л. М. О Казанской старине и не только: сборник статей. Казань: Титул, 2019. 560 с. (Zharzhevsky L. M. About Kazan antiquity and not only: collection of articles. Kazan: Title, 2019. 560 p.).
15. Дульский П. М. Классицизм в казанском зодчестве. Казань: Гос. Изд-во, 1920. 20 с. (Dulsky P. M. Classicism in Kazan architecture. Kazan: State. Publishing house, 1920. 20 p.).
16. Загоскин Н. П. Очерки города Казани и казанской жизни в 40-х годах. Казань: Изд-воКаз. гос. ун-та, 2003. 164 с. (Zagoskin N. P. Sketches of the city of Kazan and Kazan life in the 40s. Kazan: Publishing House of Kaz. state University, 2003. 164 p.).
17. Айдарова Г.Н., Краснобаев И.В. Дерево в архитектуре прибрежных территорий исторического центра Казани. Изд. : Стройматериалы, Москва, Россия, Жилищноестроительство. № 1-2. 2019. С. 30-34. (Aidarova G.N., Krasnobaev I.V. Tree in the architecture of the coastal territories of the historical center of Kazan. Ed. : Building Materials, Moscow, Russia, Housing construction. No. 1-2. 2019. pp. 30-34.).
18. Турнерелли, Э. СобраниевидовгородаКазани, рисованныеснатуры (литографии). СПб, 1839. 15 с. (Turnerelli, E. Collection of views of the city of Kazan, drawn from nature (lithographs). St. Petersburg, 1839. 15 p.)
19. Катанов, Н. Ф. Сказания иностранцев о Казани. Казань: Типо-лит. Имп. Казанск. ун-та, 1911. 17 с. (Katanov, N. F. Tales of foreigners about Kazan. Kazan: Tipo-lit. Imp. Kazan. un-ta, 1911. 17 p.).
20. Lane M. Royal Gardens of the World : 21 Celebrated Gardens from the Alhambra to Highgrove and Beyond. London : Kyle Books. 2020. 240 p.
21. Jane Whitaker. Gardens for Gloriana : Wealth, Splendour and Design in the Elizabethan Garden // Journal of British Studies. Volume 60. 202. P. 476-477. DOI:10.1017/jbr.2020.197.
22. Atkina L.I., Zbrueva, Sharafeeva. The history of development of three historical public gardens in the city of Perm // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2021. DOI:10.1088/1755-1315/876/1/012008.
23. Rafael de Brito Sousa. Patchwork quilt: A methodology proposed for the study of historic gardens / Urban Forestry & Urban Greening. Volume 62. 2021. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127169.
24. Raheleh Rostami PhD, Hasanuddin Lamit PhD. Successful public places: A case study of historical Persian gardens / Urban Forestry & Urban Greening. Volume 15. 2016. P. 211-224. DOI: 10.1016/J.UFUG.2015.08.011.
25. Anna Jakobsson, Valerie Dewaelheyns. Contemporary interpretation of the meaning and heritage of early 20th century private gardens: From an historical reflection to a future outlook in planning / Urban Forestry & Urban Greening. Volume 30. 2018. P. 210-219. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.02.003.
26. Aikaterini Gkoltsiou, Angeliki Paraskevopoulou. Landscape character assessment, perception surveys of stakeholders and SWOT analysis: A holistic approach to historical public park management / Journal of Outdoor Recreation and Tourism. Volume 35. 2021. DOI: 10.1016/j.jort.2021.100418.

27. Ahmad Zamil Zakaria, Ismail Hafiz Salleh. Identity of Malay Garden Design to be Promoted as the Cultural Tourism Product in Malaysia / Procedia - Social and Behavioral Sciences. Volume 153. 2015. P. 298-307. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.10.063.
28. Карта Казани 1877 года и часть реки Волги // Etomesto.ru: интернет-изд. 2022. URL: http://www.etomesto.ru/map-kazan_1877 (датаобращения: 02.07.22). (Map of Kazan in 1877 and part of the Volga River // Etomesto.ru: Internet ed. 2022. URL: http://www.etomesto.ru/map-kazan_1877 (date of access: 03/28/22)).
29. По ходатайству Казанского Купца Оскара Петцольд о разрешении на постройку зданий в саду Аркадия. Чертежи зданий и сооружений, генплан, 1906 г. // НАРТ, Ф. 2. Оп. 7. Д. 3045. (At the request of the Kazan Merchant Oscar Petzold for permission to build buildings in the Arkady Garden. Drawings of buildings and events, general plan, 1906 // NART, F. 2. Op. 7. D. 3045).
30. Об устройстве в Панаевском саду электрического освещения. Чертежи зданий и сооружений, генплан. 1895 г. // НАРТ, Ф. 2. Д. 7. Оп. 1214. (About the device in the Panaevsky garden of electric lighting. Drawings of buildings and structures, master plan. 1895 // NART, F. 2. D. 7. Op. 1214).
31. Об отдаче в арендное содержание с 1884г. Черноозерских зданий. Чертежи зданий и сооружений, генплан. 1884 г. // НАРТ, Ф. 98. Оп. 6. Д. 216. (On the return to the rental maintenance since 1884. Chernoozersky buildings. Drawings of buildings and structures, master plan. 1884 // NART, F. 98. Op. 6. D. 216).
32. Исторические фотографии. Проект по сбору свидетельств прошлого // Pastvu: интернет-сайт. 2009-2022. URL: https://pastvu.com (датаобращения: 26.05.22). (Historical photographs. Project to collect evidence of the past // Pastvu: website. 2009-2022. URL: https://pastvu.com (accessed: 26.05.22)).
33. О сдаче в аренду зданий в Русской Швейцарии с 1898 г. // НА РТ, Ф. 98. Оп. 3. Д. 2653. (Russian Russian Swiss buildings for rent since 1898 // ON RT, F. 98. Op. 3. d. 2653).

Информация об авторах

Альфия Рашитовна Минибаева, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
E-mail: minibaeva-alfiya@mail.ru
Марат Шигабатдинович Фазлеев, кандидат архитектуры, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет
E-mail: fastin@mail.ru

Information about the authors

Alfiya R. Minibaeva, post-graduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
E-mail: minibaeva-alfiya@mail.ru
Marat Sh. Fazleev, candidate of architecture, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
E-mail: fastin@mail.ru

Журнал «Известия КГАСУ» выходит 4 раза в год, тиражом 500 экз. Журнал является подписным изданием и включен в электронный каталог АО «ПОЧТА РОССИИ», индекс издания – ПП890 и в подписной каталог ГК «Урал - Пресс», индекс издания – 36939.

Авторы, являющиеся членами редакционной коллегии и (или) подписчиками журнала, имеют преимущественное право на опубликование своих статей.

Научные статьи в полном объеме также размещаются на официальном сайте журнала Известия КГАСУ http://izvestija.kgasu.ru. Электронное научное издание (ЭНИ) http://izvestija.kgasu.ru (Свидетельство о регистрации средства массовой информации Эл № ФС 77-31046 от 25.01.2008г.).

СТАТЬИ ПУБЛИКУЮТСЯ БЕСПЛАТНО.

Все материалы направлять по адресу: 420043, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1, Отдел Информационно-аналитического сопровождения НИР, комн. 79. Телефон (843) 510-46-39. Email: patent@kgasu.ru.

Известия КГАСУ
2022г., № 3 (61)

Гл. редактор: Низамов Р. К.
Учредитель и издатель:
ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»

Макет и редактирование: Нуруллина Г.И.

Адрес редакции: 420043, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1, комн. 79
Тел. для справок: (843) 510-46-39
Адрес издателя: 420043, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1, комн. 79

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Регистрационный номер: ПИ № ФС77-77410 от 17.12.2019г.
Электронное периодическое издание: http://izvestija.kgasu.ru
Регистр. Эл № ФС 77-31046 от 25.01.2008г.

Электронный каталог АО «ПОЧТА РОССИИ»
Индекс издания – ПП890
Подписной каталог ГК Урал-Пресс
Индекс издания – 36939

Распространение: свободная цена

Подп. к печати 27.09.2022 Формат 60×84/8
Заказ 127 Бумага тип. №1
Усл.-печ. л19.9 Уч.-изд. л. 20,4
Тираж 500 экз.
I завод – 100

Дата выхода в свет: 30.09.2022г.

Отпечатано в Издательстве КГАСУ: 420061, г. Казань, ул. Николая Ершова, д.31Б