



ISSN 0044-4472

12'2023

ЖИЛИЩНОЕ

# СТРОИТЕЛЬСТВО

научно-технический и производственный журнал

[www.rifsm.ru](http://www.rifsm.ru)

[www.journal-hc.ru](http://www.journal-hc.ru)

издается с 1958 г.



**ОКОННЫЕ СИСТЕМЫ VEKA  
для самых сложных  
архитектурных задач**

**VEKA**

# ГЕОРЕКОНСТРУКЦИЯ

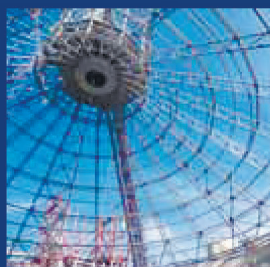


ПРОЕКТИРОВАНИЕ

ОБСЛЕДОВАНИЯ

ИЗЫСКАНИЯ

ГЕОТЕХНИКА



- АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ;
- ВСЕ ВИДЫ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ;
- ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ;
- РАСЧЕТЫ ОСНОВАНИЙ И ЗДАНИЙ (СООРУЖЕНИЙ);
- ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ;
- СОХРАНЕНИЕ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ;
- НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ГЕОТЕХНИКИ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.

ПИ «ГЕОРЕКОНСТРУКЦИЯ»

190005, Санкт-Петербург,  
Измайловский пр., дом 4

Тел. (812) 339 35 87

Факс (812) 339 36 25

e-mail: [info@georeconstruction.ru](mailto:info@georeconstruction.ru)

[www.georeconstruction.ru](http://www.georeconstruction.ru)

Учредитель журнала: АО «ЦНИИЭП жилища»

Адрес: Россия, 127434, Москва,  
Дмитровское ш., д. 9, стр. 3

Издатель: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»  
Адрес: 125319, г. Москва, ул. Черняховского,  
д. 9, корп. 1, кв. 1

Входит в Перечень ВАК,  
государственный проект РИНЦ и RSCI

Журнал зарегистрирован Министерством РФ  
по делам печати, телерадиовещания  
и средств массовой информации № ФС77-64906

#### Главный редактор

ЮМАШЕВА Е.И.,  
инженер-химик-технолог,  
почетный строитель России

#### Редакционный совет:

НИКОЛАЕВ С.В.,  
председатель, д-р техн. наук,  
АО «ЦНИИЭП жилища» (Москва)

АЗАРОВ В.Н.,  
д-р техн. наук (Волгоград)

АКИМОВ П.А.,  
д-р техн. наук, академик РААСН (Москва)

АЛЕКСЕЕВ Ю.В.,  
д-р архитектуры, профессор (Москва)

БОДРОВ М.В.,  
д-р техн. наук (Нижний Новгород)

ВАВРЕНЮК С.В.,  
д-р техн. наук, член-корреспондент  
РААСН (Владивосток)

ВОЛКОВ А.А.,  
д-р техн. наук, член-корреспондент  
РААСН (Москва)

ГАГАРИН В.Г.,  
д-р техн. наук, член-корреспондент  
РААСН (Москва)

ЖУСУПБЕКОВ А.Ж.,  
д-р техн. наук (Астана, Казахстан)

ЗВЕЗДОВ А.И.,  
д-р техн. наук, президент Ассоциации  
«Железобетон» (Москва)

ИЛЬИЧЕВ В.А.,  
д-р техн. наук, академик РААСН (Москва)

КОЛЧУНОВ В.И.,  
д-р техн. наук, академик РААСН (Москва)

ЛАПИДУС А.А.,  
д-р техн. наук, профессор (Москва)

МАНГУШЕВ Р.А.,  
д-р техн. наук, член-корреспондент  
РААСН (Санкт-Петербург)

ОРЕЛЬСКАЯ О.В.,  
д-р архитектуры, член-корреспондент  
РААСН, профессор (Нижний Новгород)

ОСИПОВА Н.Н.,  
д-р техн. наук (Саратов)

СКОЛУБОВИЧ Ю.Л.,  
д-р техн. наук, член-корреспондент  
РААСН (Новосибирск)

СУББОТИН О.С.,  
д-р архитектуры (Краснодар)

ТАБУНЩИКОВ Ю.А.,  
д-р техн. наук, член-корреспондент  
РААСН, профессор (Москва)

ТЕР-МАРТИРОСЯН А.З.,  
д-р техн. наук (Москва)

ТИХОНОВ И.Н.,  
д-р техн. наук (Москва)

ФЕДОСОВ С.В.,  
д-р техн. наук, профессор,  
академик РААСН (Москва)

#### Авторы

опубликованных материалов несут  
ответственность за достоверность  
приведенных сведений, точность данных  
по цитируемой литературе  
и за использование в статьях данных,  
не подлежащих открытой публикации.

#### Редакция

может опубликовать статью  
в порядке обсуждения,  
не разделяя точку зрения автора.

#### Перепечатка

и воспроизведение статей, рекламных  
и иллюстративных материалов возможны  
только с письменного разрешения главного  
редактора.

Редакция не несет ответственности  
за содержание рекламы и объявлений.

# ЖИЛИЩНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Издается с 1958 г.

12'2023

## Светопрозрачные конструкции

А.П. КОНСТАНТИНОВ, И.С. АКСЁНОВ

Особенности работы анкерных пластин для крепления оконных блоков  
при действии ветровых нагрузок . . . . . 3

Т.В. ГУТОРА, А.А. ВЕРХОВСКИЙ

Проектирование КФС высотных зданий . . . . . 8

С.Н. ОВСЯННИКОВ, А.С. САМОХВАЛОВ

Звукоизоляция однослойных остеклений, одно- и двухкамерных стеклопакетов . . . . . 12

А.П. КОНСТАНТИНОВ, И.С. АКСЁНОВ, А.Е. ЕЛОХОВ

Использование термографии для определения граничных условий теплообмена  
у внутренних поверхностей светопрозрачных ограждающих конструкций . . . . . 18

Е.С. ЮРЫШЕВ, А.А. ВЕРХОВСКИЙ, С.С. ПОТАПОВ

Определение приведенного сопротивления теплопередаче непрозрачных участков  
конструкций фасадных светопрозрачных . . . . . 22

## Подземное строительство

О.А. ШУЛЯТЬЕВ, С.О. ШУЛЯТЬЕВ, П.Г. ШИХРАНОВ, В.В. ОРЕХОВ, Н.К. РОЗЕНТАЛЬ

Увеличение несущей способности основания пяты сваи . . . . . 26

В.А. ШАШКИН

Накопленные деформации исторической застройки Санкт-Петербурга . . . . . 32

## Градостроительство и архитектура

М.А. СЛЕПНЕВ, Е.В. ШМЫГЛИНА

Формирование природного каркаса при реорганизации  
промышленных зон Ростова-на-Дону . . . . . 46

## Материалы и конструкции

А.И. ВАЛИЕВ, А.М. СУЛЕЙМАНОВ

Гибридные полимерные композиты конструкционного назначения . . . . . 51

## Расчет конструкций

А.А. КЛЮКИН

Экспериментальные исследования сжато-изгибаемых элементов  
составного сечения на ввинченных стержнях . . . . . 58

П.А. ХАЗОВ, А.П. ПОМАЗОВ

Экспериментальное исследование продольного и поперечного изгиба  
трубобетонных стержней . . . . . 66

А.В. ТАНАСОГЛО, И.М. ГАРАНЖА, С.Р. ФЕДОРОВА

Мониторинг одностоечных свободностоящих опор воздушных линий  
электропередачи при действии ветровых нагрузок . . . . . 73

Указатель статей, опубликованных в журнале «Жилищное строительство» в 2023 г.,  
см. на сайте [https://journal-hc.ru/images/files/2023/12\\_079.pdf](https://journal-hc.ru/images/files/2023/12_079.pdf)



Founder of the journal: AO «TSNIEP zhilishcha»  
Address: 9/3 Dmitrovskoye Highway, 127434,  
Moscow, Russian Federation

Publisher: «STROYMATERIALY»  
Advertising-Publishing Firm, OOO  
Address: 1, 9 Bldg. 1, Chernyakhovskogo Street,  
Moscow, 125319, Russian Federation

The journal is registered by the RF Ministry  
of Press, Broadcasting and Mass  
Communications, № FS77-64906

#### Editor-in-chief

YUMASHEVA E.,  
chemical process engineer,  
Honorary Builder of Russia

#### Editorial Board:

NIKOLAEV S.,  
Chairman,  
Doctor of Sciences (Engineering),  
AO «TSNIEP zhilishcha» (Moscow)

AKIMOV P.,  
Doctor of Sciences (Engineering),  
Academician of RAACS (Moscow)

ALEKSEEV Yu.,  
Doctor of Architecture, Professor (Moscow)

AZAROV V.,  
Doctor of Sciences (Engineering),  
(Volgograd)

BODROV M.V.,  
Doctor of Sciences (Engineering)  
(Nizhny Novgorod)

FEDOSOV S.,  
Doctor of Science (Engineering), Professor,  
Academician of RAACS (Moscow)

GAGARIN V.,  
Doctor of Sciences (Engineering),  
Corresponding member of RAACS  
(Moscow)

IL'ICHEV V.,  
Doctor of Sciences (Engineering),  
Academician of RAACS, Research  
Supervisor of the Academic Scientific  
and Creative Center of RAACS (Moscow)

KOLCHUNOV V.,  
Doctor of Sciences (Engineering),  
Academician of RAACS (Moscow)

LAPIDUS A.A.,  
Doctor of Sciences (Engineering),  
Professor (Moscow)

MANGUSHEV R.,  
Doctor of Sciences (Engineering),  
Corresponding member of RAACS  
(Saint-Petersburg)

ORELSKAYA O.,  
Doctor of Architecture, Corresponding  
member of RAACS, Professor  
(Nizhny Novgorod)

OSIPOVA N.N.,  
Doctor of Sciences (Engineering) (Saratov)

SKOLUBOVICH Yu.,  
Doctor of Sciences (Engineering),  
Corresponding member of RAACS  
(Novosibirsk)

SUBBOTIN O.,  
Doctor of Architecture (Krasnodar)

TABUNTSCHIKOV Yu.A.,  
Doctor of Sciences (Engineering),  
Corresponding member of RAACS,  
Professor (Moscow)

TER-MARTIROSIAN A.,  
Doctor of Sciences (Engineering) (Moscow)

TIKHONOV I.,  
Doctor of Sciences (Engineering) (Moscow)

VAVRENIUK S.,  
Doctor of sciences (Engineering),  
Corresponding member of RAACS  
(Vladivostok)

VOLKOV A.,  
Doctor of Sciences (Engineering),  
Corresponding member of RAACS (Moscow)

ZHUSUPBEKOV A.,  
Doctor of Sciences (Engineering)  
(Astana, Kazakhstan)

ZVEZDOV A.,  
Doctor of Sciences (Engineering), President,  
Association «Zhelezobeton» (Moscow)

#### The authors

of published materials are responsible for the accu-  
racy of the submitted information, the accuracy of  
the data from the cited literature and for using in  
articles data which are not open to the public.

#### The Editorial Staff

can publish the articles as a matter for discussion,  
not sharing the point of view of the author.

#### Reprinting

and reproduction of articles, promotional and illus-  
trative materials are possible only with the written  
permission of the editor-in-chief.

The Editorial Staff is not responsible for the  
content of advertisements and announcements.

# ZHILISHCHNOE STROITEL'STVO

Published since 1958

12'2023

## Translucent structures

A.P. KONSTANTINOV, I.S. AKSENOV

Features of the Operation of Anchor Plates for Fixing Windows  
under the Action of Wind Loads . . . . . 3

T.V. GUTORA, A.A. VERKHOVSKY

Design of FTS for High-Rise Buildings . . . . . 8

S.N. OVSYANNIKOV, A.S. SAMOKHVALOV

Sound Insulation of Single-Layer Glazing, Single- and Double-Glazed Windows . . . . . 12

A.P. KONSTANTINOV, I.S. AKSENOV, A.E. ELOHOV

The use of Thermography to Determine the Boundary Conditions of Heat Exchange  
on The Inner Surfaces of Translucent Enclosing Structures . . . . . 18

E.S. YURYSHEV, A.A. VERKHOSKIY, S.S. POTAPOV

Determination of the Reduced Heat Transfer Resistance of Opaque Sections  
of Facade Translucent Structures . . . . . 22

## Underground construction

O.A. SHULIATIEV, S.O. SHULIATIEV, P.G. SHIKHRANOV, V.V. OREKHOV, N.K. ROZENTAL

Increasing the Bearing Capacity of the Base of the Pile Heel . . . . . 26

V.A. SHASHKIN

Accumulated Deformations of the Historical Development of St. Petersburg . . . . . 32

## Town planning and architecture

M.A. SLEPNEV, E.V. SHMYGLINA

Formation of the Natural Framework During the Reorganization  
of Industrial Zones in Rostov-Na-Don . . . . . 46

## Materials and structures

A.I. VALIEV, A.M. SULEIMANOV

Hybrid Polymer Composites for Structural Purposes . . . . . 51

## Structural calculations

A.A. KLYUKIN

Experimental Studies of Compressed-Bendable Elements of Composite Cross-Section  
on Screwed-in Rods . . . . . 58

P.A. KHAZOV, A.P. POMAZOV

Experimental Study of Longitudinal and Transverse Bending of Pipe Concrete Rods . . . . . 66

A.V. TANASOGLO, I.M. GARANZHA, S.R. FEDOROVA

Monitoring of Single-Post Free-Standing Supports of Overhead Power Lines  
under the Action of Wind Loads . . . . . 73

Editorial address: 9/3, Dmitrovskoye Hwy, 127434, Moscow, Russian Federation

Tel.: (499) 390-87-17

Email: mail@rifsm.ru

http://www.journal-hc.ru

http://www.rifsm.ru

УДК 692.82

DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-3-7>

А.П. КОНСТАНТИНОВ, канд. техн. наук (apkonst@yandex.ru),  
И.С. АКСЁНОВ, инженер (ivanak1995@mail.ru)

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

## Особенности работы анкерных пластин для крепления оконных блоков при действии ветровых нагрузок

*Проведены численные и лабораторные исследования по изучению статической работы анкерных пластин при действии ветровых нагрузок. Численные исследования работы стандартной анкерной пластины при действии сжимающей нагрузки, действующей перпендикулярно плоскости окна, показали, что ее несущая способность в несколько раз меньше усилия, возникающего в местах крепления оконных блоков при действии на них пиковых ветровых нагрузок. В то же время существующий опыт эксплуатации смонтированных оконных блоков показывает, что анкерные пластины в подавляющем большинстве случаев сохраняют свою несущую способность в течение всего срока службы оконного блока. Это свидетельствует о том, что применяемая на практике упрощенная расчетная схема анкерной пластины не в полной мере отражает ее действительную работу в составе оконной конструкции. Данное утверждение было проверено в ходе лабораторных испытаний типовой конструкции оконного блока, закрепленного при помощи анкерных пластин к раме, имитирующей оконный проем, и с устроенным монтажным швом. Установлено, что на статическую работу анкерной пластины существенное влияние оказывает как раскрепление оконной рамы монтажной пеной, так и ограничение деформаций самой анкерной пластины оконными откосами. Вопрос расчета анкерных пластин на действие ветровых нагрузок должен быть рассмотрен профессиональным сообществом в целях выработки как общих подходов к расчету подобных крепежных элементов, так и принципиальной возможности их применения для монтажа оконных блоков, особенно в зданиях с повышенным уровнем ответственности.*

**Ключевые слова:** светопрозрачная конструкция, окно, анкерная пластина, несущая способность, оконный крепеж.

**Для цитирования:** Константинов А.П., Аксёнов И.С. Особенности работы анкерных пластин для крепления оконных блоков при действии ветровых нагрузок // *Жилищное строительство*. 2023. № 12. С. 3–7.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-3-7>

A.P. KONSTANTINOV, Candidate of Sciences (Engineering) (apkonst@yandex.ru),  
I.S. AKSENOV, Engineer (ivanak1995@mail.ru)

National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

### Features of the Operation of Anchor Plates for Fixing Windows under the Action of Wind Loads

Numerical and laboratory studies have been carried out to study the static operation of anchor plates under the action of wind loads. Numerical studies of the operation of a standard anchor plate under the action of a compressive load acting perpendicular to the plane of the window have shown that its carrier is several times less than the force that occurs at the attachment points of window blocks when peak wind loads are applied to them. At the same time, the existing experience in the operation of window blocks shows that anchor plates in the vast majority of cases retain their bearing capacity throughout the entire working life of the window block. This indicates that the simplified design scheme of the anchor plate used in practice does not fully reflect its actual operation as part of the window structure. This statement was verified during laboratory tests of a window block with typical design fixed with anchor plates to a frame that simulates a window opening. It is established that the static operation of the anchor plate is significantly influenced by both the fastening of the window frame with mounting foam and the limitation of anchor plates deformations by window slopes. The issue of calculating anchor plates for the effect of wind loads should be considered by the professional community in order to develop both common approaches to the calculation of such fasteners and the fundamental possibility of their use for windows installation, especially in unique buildings.

**Keywords:** translucent structures, windows, anchor plate, load-bearing capacity, window fasteners.

**For citation:** Konstantinov A.P., Aksenov I.S. Features of the operation of anchor plates for fixing windows under the action of wind loads. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2023. No. 12, pp. 3–7. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-3-7>

Анкерные пластины уже долгое время являются одним из самых распространенных типов крепежных элементов, применяемых в отечественной и зарубежной строительной практике для монтажа оконных блоков в световых проемах наружных стен (Руко-

водство по установке окон и наружных дверей. Розенхайм: Институт оконных технологий, 2016. 251 с.; Борискина И.В., Шведов Н.В., Плотников А.А. Современные светопрозрачные конструкции гражданских зданий: Справочник проектировщика. Т. 2. Оконные

конструкции из ПВХ. СПб.: НИУПЦ «Межрегиональный институт окна», 2005. 320 с.; Борискина И.В. Здания и сооружения со светопрозрачными фасадами и кровлями. Теоретические основы проектирования светопрозрачных конструкций. СПб.: Инженерно-информационный Центр Оконных Систем. 2012. 400 с.). Это обусловлено не только их низкой стоимостью, но и высокой технологичностью применения.

Анкерные пластины изготавливаются из листовой стали методом штамповки. Геометрия и сечение анкерных пластин подобраны таким образом, чтобы имелась возможность легко менять их форму в зависимости от параметров монтажного зазора и оконных профилей. Ввиду особенностей своего устройства анкерная пластина способна компенсировать температурные деформации оконных рам [1–4], а также воспринимать только нагрузки, действующие перпендикулярно плоскости окна.

В существующей строительной практике статический расчет анкерных пластин в большинстве случаев не выполняется. В то же время очевидно, что для последних этажей многоэтажных зданий и в особенности высотных зданий данный расчет следует выполнять в обязательном порядке, так как на окна в процессе их эксплуатации могут действовать значительные по величине ветровые нагрузки [5–9].

Применяемые на практике расчетные схемы анкерных пластин сильно упрощены и сводятся зачастую к их рассмотрению как стержневой системы из нескольких элементов (рис. 1). Подобный подход вполне применим для анкерных пластин индивидуального изготовления, выполненных из листового металла толщиной 3 мм и более, но некорректен для типовых конструктивных решений анкерных пластин толщиной до 1,2–2 мм. Это обусловлено наличием в таких пластинах большого количества технологических отверстий и мест перегибов, служащих для удобства проведения монтажных работ. В настоящее время детальные исследования данного типа крепежных элементов при действии ветровых нагрузок еще не проводились.

## Материалы и методы исследований

**1. Численные исследования работы анкерных пластин при действии ветровых нагрузок.** Выполнены численные исследования стандартной анкерной пластины размерами 165×25×1,2, применяемой для монтажа оконных блоков. Материал пластины – оцинкованная сталь марки 08ПС.

Расчет данного типа пластины выполнен при ширине монтажного зазора между рамой оконного блока и торцом оконного откоса в 40 мм. Проектное положение оконного блока в проеме при данной величине зазора показано на рис. 2, а. На рис. 2, б пред-

ставлены размеры анкерной пластины в монтажном положении. На практике, безусловно, могут происходить локальные перегибы анкерных пластин, являющиеся концентраторами напряжений. Однако данный случай в дальнейшем рассмотрен не будет.

В качестве расчетной была принята схема, показанная на рис. 3. На рис. 4 показано, как данная расчетная схема реализована в программе SCAD++. Геометрия анкерной пластины была смоделирована при помощи треугольных элементов оболочек (тип КЭ 42).

Расчет выполнялся для нескольких значений нагрузок (от 75 до 150 Н с шагом 25 Н), после чего для каждой из нагрузок были определены эквивалентные напряжения по Мизесу ( $\sigma_{E4}$ ). В таблице представлены результаты расчета. Красным цветом выделены области, где эквивалентные напряжения больше расчетного предела текучести материала пластины  $R_y$  (стали марки 08ПС) с учетом коэффициента надежности по материалу.

На рис. 5 показан график зависимости максимального эквивалентного напряжения по Мизесу во всей пластине от действующей нагрузки.

Методом интерполяции найдем точку, где представленный на рис. 7 график пересекает предел текучести материала анкерной пластины. Установлено, что для рассмотренной пластины и ширины монтажного зазора максимальная нагрузка, которую способна выдержать анкерная пластина до перехода в пластическую стадию работы, составляет всего  $R_{max}=80$  Н. Очевидно, что из-за наличия технологических отверстий и мест перегибов при увеличении толщины пластины до 1,5 мм (2 мм) несущая способность анкерной пластины подобной конструкции существенно не возрастет.

## 2. Лабораторные исследования работы анкерных пластин совместно с монтажным швом и рамой оконного блока при действии ветровых нагрузок.

Оценка несущей способности анкерных пластин в составе узла сопряжения оконных блоков и стеновых проемов при действии ветровой нагрузки выполнена в испытательной лаборатории «Светопрозрачные и фасадные конструкции» Института комплексной безопасности в строительстве НИУ МГСУ.

Лабораторные испытания проводились на образце трехстворчатого оконного блока из ПВХ профилей с габаритными размерами 2310×1990 мм. Для проведения лабораторных исследований была изготовлена прямоугольная монтажная рама из деревянного бруса сечением 100×200 мм. Закрепление испытуемого оконного блока в монтажной раме выполнено с применением анкерных пластин размером 165×25×1,2 мм. Закрепление анкерной пластины к оконной раме выполнено с применением

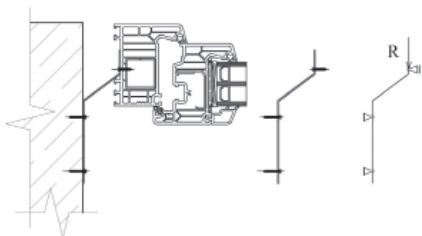


Рис. 1. Типовая расчетная схема анкерной пластины, применяемая в строительной практике

Fig. 1. A typical design scheme of an anchor plate used in construction practice

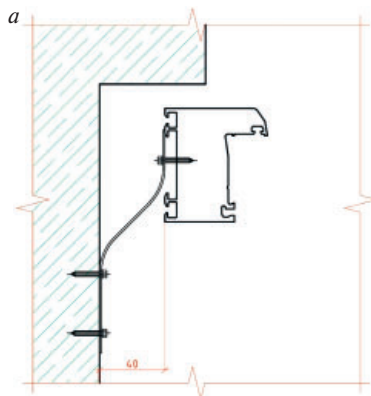


Рис. 2. Проектное положение оконного блока в проеме (а) и размеры анкерной пластины в монтажном положении (b)

Fig. 2. The design position of the window block in the opening (a) and the dimensions of the anchor plate in the mounting position (b)

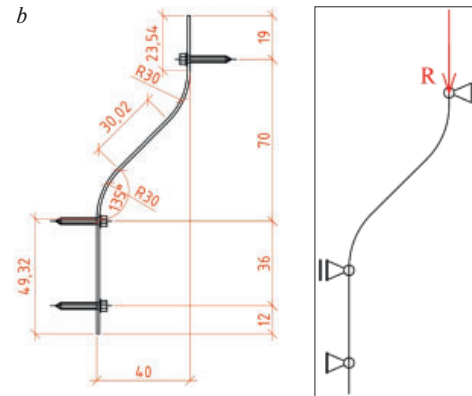


Рис. 3. Расчетная схема анкерной пластины

Fig. 3. Design diagram of the anchor plate

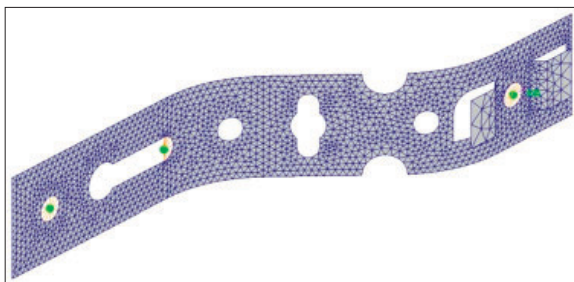


Рис. 4. Расчетная схема анкерной пластины в SCAD++

Fig. 4. The model of the anchor plate in SCAD++

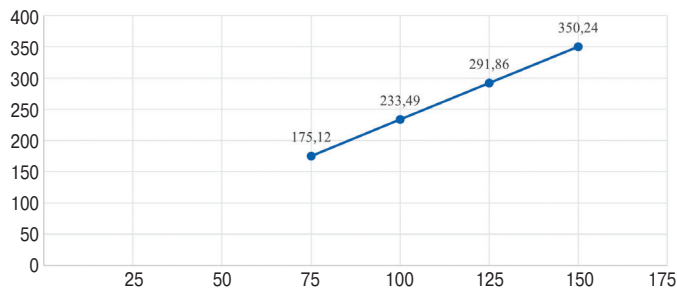


Рис. 5. Зависимость максимального напряжения по Мизесу (МПа) в анкерной пластине от нагрузки (N)

Fig. 5. Dependence of the maximum Mises stresses (MPa) in the anchor plate on the load (N)



Рис. 6. Общий вид испытательного стенда с установленным оконным блоком

Fig. 6. General view of the test bench with the window installed



Рис. 7. Общий вид анкерных пластин в составе узла сопряжения оконного блока

Fig. 7. General view of the anchor plates in the window

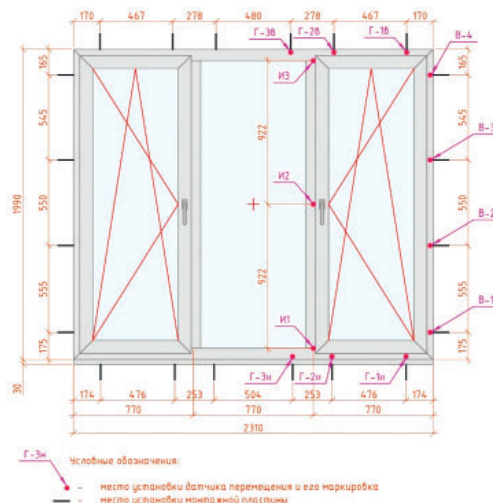


Рис. 8. Схема расстановки датчиков перемещения на оконном блоке

Fig. 8. Displacement sensors diagram

самонарезающих винтов. Закрепление анкерной пластины к монтажной раме выполнено с применением дюбель-гвоздей.

Монтажный зазор между оконным блоком и монтажной рамой составлял 40 мм. После установки анкерных пластин он был заполнен монтажной пеной,

а с наружной стороны оконной рамы дополнительно загерметизирован диффузионной лентой.

Общий вид испытываемого оконного блока представлен на рис. 6. Общий вид анкерных пластин в составе узла сопряжения оконного блока – на рис. 7.

Эквивалентные напряжения по Мизесу  
анкерной пластины  
Equivalent Mises stresses in the anchor plate

R, Н	Внутренний слой	Внешний слой
75		
100		
125		
150		

**Примечание.** Красным цветом показаны области, где  $\sigma_{E4} > R_y$ .

Оценка несущей способности анкерных пластин в составе узла сопряжения оконного блока к стеновому проему при действии ветрового давления выполнялась на базе методики ГОСТ 26602.5–2001 «Блоки оконные и дверные. Методы определения сопротивления ветровой нагрузке».

Исследования проводились в три этапа.

**Этап 1.** Воздействие на испытуемый оконный блок положительного и отрицательного значений нормативной пиковой ветровой нагрузки. В качестве нормативного значения пиковой ветровой нагрузки принята ветровая нагрузка, равная по абсолютному значению 750 Па. На первом этапе оконный блок был последовательно испытан на действие положительного, а затем отрицательного значения нормативной пиковой ветровой нагрузки.

**Этап 2.** Циклическое воздействие на испытуемый оконный блок знакопеременной ветровой нагрузки. В качестве ветровой нагрузки для циклических воздействий была принята нагрузка, соответствующая половине нормативного значения ветровой нагрузки. Количество циклов испытаний – 50.

**Этап 3.** Воздействие на испытуемый оконный блок положительного и отрицательного значений расчетной пиковой ветровой нагрузки. На данном этапе испытуемый оконный блок сначала был однократно нагружен отрицательной ветровой нагрузкой величиной минус 1050 Па, а затем однократно положительной ветровой нагрузкой плюс 1050 Па. На каждом этапе испытаний выполнялся визуальный контроль целостности анкерных пластин.

Для контроля перемещений рамы оконного блока при действии ветровой нагрузки в местах установки

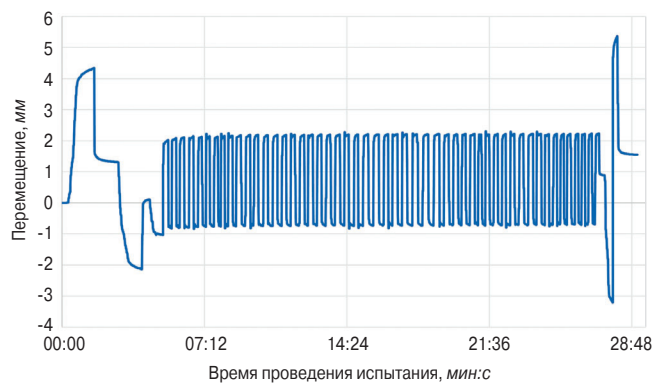


Рис. 9. График перемещения точки «Г-3в»

Fig. 9. Graph of the movement of the point «Г-3в»

анкерных пластин были установлены датчики линейных перемещений, данные с которых в ходе испытаний автоматически считывались системой мониторинга Терем 4.1. Ввиду симметричности оконного блока датчики перемещений размещены только на половине оконного блока (см. схему на рис. 8). Установлено, что максимальные перемещения наблюдались в верхней точке крепления импоста ГЗ-В (рис. 9). При этом перемещения не превышали величины 4,5 мм.

После проведения испытаний выполнено удаление монтажной пены из монтажного шва и проведена оценка целостности анкерных пластин и их крепежных элементов. Нарушения целостности анкерных пластин и их крепежных элементов при этом не выявлено.

### Обсуждение

Полученные результаты лабораторных испытаний свидетельствуют о необходимости учета в расчетных схемах анкерных пластин для монтажа оконных блоков влияния монтажного шва и элементов отделки окна (откосов, подоконника). Этот вопрос является дискуссионным, так как в значительной степени зависит от эксплуатационно-технических характеристик и материалов монтажного шва, в том числе их долговечности [10,11].

### Выводы

Проведенные численные исследования статической работы анкерных пластин показали, что их несущая способность не превышает 80 Н (для пластин толщиной 1,2 мм), что недостаточно для восприятия пиковых ветровых нагрузок на окна.

Проведенные лабораторные исследования показывают, что упрощенная расчетная схема анкерной пластины не в полной мере отражает ее действительную работу в составе оконной конструкции. В частности, установлено, что на статическую работу анкерной пластины существенное влияние оказывает раскрепление оконной рамы монтажной пеной. Очевидно,

что и оконные откосы будут сдерживать деформации анкерной пластины; при действии ветровой нагрузки оконная рама поворачивается относительно своей оси в сторону действия нагрузки, вызывая при этом кручение анкерной пластины.

### Список литературы

1. Калабин В.А. Оценка величины тепловой деформации ПВХ-профиля. Ч. 1. Зимние поперечные деформации // *Светопрозрачные конструкции*. 2013. № 1–2. С. 6–9.
2. Калабин В.А. Оценка величины тепловой деформации ПВХ-профиля. Ч. 2. Летние поперечные деформации // *Светопрозрачные конструкции*. 2013. № 3. С. 12–15.
3. Калабин В.А. Оценка величины тепловой деформации ПВХ-профиля. Ч. 3. Интенсивность прямого солнечного излучения // *Светопрозрачные конструкции*. 2013. № 4. С. 34–38.
4. Аксенов И.С., Константинов А.П. Аналитический метод расчета напряженно-деформированного состояния оконных профилей ПВХ при действии температурных нагрузок // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. № 11. С. 1437–1451. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1437-1451
5. Aksenov I.S. and Konstantinov A.P. Temperature deformations of PVC window profiles with reinforcement. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. Vol. 18. No. 2, pp. 98–111. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-2-98-111
6. Konstantinov A., Lambias Ratnayake M. Calculation of PVC windows for wind loads in high-rise buildings. *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 33. 02025. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302025>
7. Галямичев А. В. Ветровая нагрузка и ее действие на фасадные конструкции // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2017. № 9 (60). С. 44–57. DOI: 10.18720/CUBS.60.4
8. Prevat D.O. Wind load design and performance testing of exterior walls: Current standards and future considerations. *Performance of exterior building walls*. ed. P. Johnson (West Conshohocken, PA: ASTM International, 2003), pp. 17–41. DOI: 10.1520/stp10925s
9. Melnikova I., Boriskina I. Modern translucent structures in multistory residential buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 022021. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022021
10. Константинов А.П., Семенов В.С. Прочностные и деформативные характеристики современных монтажных пен эконом-класса // *Строительные материалы*. 2019. № 3. С. 28–32. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-768-3-28-32>
11. Ларин О.А., Кашуркин А.Ю., Митрофанова Н.В., Федченко Е.В. Исследования устойчивости к эксплуатационным воздействиям комплектов для структурного остекления фасадов // *Строительные материалы*. 2022. № 7. С. 57–62. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-804-7-57-62>

Рассмотренные факторы необходимо учитывать при назначении расчетных схем анкерных пластин. Авторы не претендуют на полноту охвата рассматриваемого вопроса и приглашают всех заинтересованных лиц к дискуссии и сотрудничеству.

### References

1. Kalabin V.A. Assessment of PVC profile thermal deformation. Part 1. Winter transverse deformations. *Svetoprozrachnye konstrukcii*. 2013. No. 1–2, pp. 6–9. (In Russian).
2. Kalabin V.A. Assessment of PVC profile thermal deformation. Part 2. Summer transverse deformations. *Svetoprozrachnye konstrukcii*. 2013. No. 3, pp. 12–15. (In Russian).
3. Kalabin V.A. Assessment of PVC profile thermal deformation. Part 3. The intensity of direct solar radiation. *Svetoprozrachnye konstrukcii*. 2013. No. 4, pp. 34–38. (In Russian).
4. Aksenov I.S., Konstantinov A.P. An analytical method for calculating the stress-strain state of PVC window profiles under thermal loading. *Vestnik MSUCE*. 2021. Vol. 16. No. 11, pp. 1437–1451. (In Russian). DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1437-1451
5. Aksenov I.S. and Konstantinov A.P. Temperature deformations of PVC window profiles with reinforcement. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. Vol. 18, No. 2, pp. 98–111. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-2-98-111
6. Konstantinov A., Lambias Ratnayake M. Calculation of PVC windows for wind loads in high-rise buildings. *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 33. 02025. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302025>
7. Galyamichev A.V. Wind load and its action on facade structures. *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij*. 2017. No. 9 (60), pp. 44–57. (In Russian). DOI: 10.18720/CUBS.60.4
8. Prevat D.O. Wind load design and performance testing of exterior walls: Current standards and future considerations. *Performance of exterior building walls*. ed. P. Johnson (West Conshohocken, PA: ASTM International, 2003), pp. 17–41. DOI: 10.1520/stp10925s
9. Melnikova I., Boriskina I. Modern translucent structures in multistory residential buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 022021. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022021
10. Konstantinov A.P., Semenov V.S. Strength and deformation characteristics of modern PU-foams economy class. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 3, pp. 28–32. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-768-3-28-32>
11. Larin O.A., Kashurkin A.Yu., Mitrofanova N.V., Fedchenko E.V. Investigation of the resistance to operational impacts of sets for structural glazing of facades. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 7, pp. 57–62. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-804-7-57-62>

УДК 692.82

DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-8-11>

Т.В. ГУТОРА<sup>1</sup>, руководитель группы проектного бюро (gutora.tanya@mail.ru);  
А.А. ВЕРХОВСКИЙ<sup>2</sup>, канд. техн. наук (v2508@rambler.ru).

<sup>1</sup> АО «ШУКО Интернационал Москва» (141504, Московская обл., г. Солнечногорск, ул. Разина, 8)

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

## Проектирование КФС высотных зданий

*Рассматриваются проблемы, возникающие при проектировании конструкций фасадных светопрозрачных (КФС) для высотных зданий. Основная проблема при проектировании – корректный выбор исходных данных для задания наружных и внутренних граничных условий. Некорректный или ошибочный выбор этих параметров может оказать существенное влияние на расчетную модель и полученные результаты оценки теплотехнических характеристик конструкции расчетным методом. В результате проведенного анализа определены основные принципы подготовки расчетной модели и проведения оценки теплотехнических характеристики КФС для высотных зданий.*

**Ключевые слова:** конструкции фасадные светопрозрачные, высотные здания, теплотехнический расчет, параметры внутреннего микроклимата.

**Для цитирования:** Гутора Т.В., Верховский А.А. Проектирование КФС высотных зданий // *Жилищное строительство*. 2023. № 12. С. 8–11. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-8-11>

T.V. GUTORA<sup>1</sup>, Head of the Project Bureau Group (gutora.tanya@mail.ru);

A.A. VERKHOVSKY<sup>2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (v2508@rambler.ru)

<sup>1</sup> JSC “SCHUECO International Moscow” (8, Razina Street, Solnechnogorsk, Moscow Region. 141504, Russian Federation)

<sup>2</sup> Scientific-Research Institute of Building Physics of RAACS (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

### Design of FTS for High-Rise Buildings

The problems arising in the design of facade translucent structures (FTS) for high-rise buildings are considered. The main problem in the design is the correct choice of source data for setting external and internal boundary conditions. An incorrect or erroneous choice of these parameters can have a significant impact on the calculation model and the results obtained for evaluating the thermal characteristics of the structure by the calculation method. As a result of the analysis conducted, the basic principles of preparing a calculation model and evaluating the thermal characteristics of the FTS for high-rise buildings were determined.

**Keywords:** façade translucent structures, high-rise buildings, thermal engineering calculations, parameters of internal microclimate.

**For citation:** Gutora T.V., Verkhovsky A.A. Design of FTS for high-rise buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2023. No. 12, pp. 8–11. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-8-11>

Существующая нормативная техническая документация не позволяет грамотно и корректно выбрать исходные параметры для проектирования современных светопрозрачных ограждающих конструкций для высотных зданий. Поэтому первым шагом к решению проблемы является выбор значимых параметров для проектирования и оценка их влияния на эксплуатационные характеристики конструкций.

Нормативные документы, которые применимы непосредственно к определению климатических характеристик для КФС, а именно: СП 267.1325800.2016 «Здания и комплексы высотные. Правила проектирования», СП 131.13330.2020 «Строительная климатология», СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий», ГОСТ 30494–2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях», в настоящее время не отображают полную картину реальных условий эксплуатации высотных объектов.

В работах [1, 2] отмечено, что значимым параметром при определении теплотехнических характеристик светопрозрачных конструкций является не только

температура наружного воздуха, но и коэффициент теплоотдачи наружной поверхности. В частности, в [1] на основании теплотехнических расчетов сделаны выводы о существенном снижении температуры на внутренней поверхности конструкции за счет корректировки коэффициента теплоотдачи наружной поверхности.

Другим значимым параметром для определения теплотехнических характеристик КФС является режим теплообмена внутренней поверхности [3–9]. Подробно эти вопросы исследованы в [7].

При выборе параметров для расчетов высотных зданий необходимо учитывать снижение температуры наружного воздуха по высоте здания. Согласно п. 11 СП 267.1325800.2016 параметры наружного воздуха следует принимать с учетом понижения температуры воздуха на 1°C на каждые 100 м по высоте здания. Предлагаемая зависимость принята согласно Изменению № 1 к СП 267.1325800.2016, введенному 30.12.2020 г., и прямо противоречит ГОСТ 4401–81 «Атмосфера стандартная. Параметры». Целесообразно использовать данные метеостанций для района строительства при

наличии у них информации по изменению температуры и скорости ветра по высоте проектируемого здания. Для объектов высотой 100–150 м эти корректировки могут быть несущественны, тогда как для 400–500–700–900 м внесенные изменения могут оказать существенное влияние на выбор параметров проектирования.

Сложными для анализа параметрами при оценке теплотехнических характеристик КФС высотных зданий является коэффициенты теплоотдачи наружной и внутренней поверхностей.

Согласно табл. 6 СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» коэффициент теплоотдачи наружной поверхности  $\alpha_n$  для «наружных стен, покрытий, перекрытий над проездами и над холодными (без ограждающих стенок) подпольями в Северной строительно-климатической зоне» составляет 23 Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

Нормативные документы ГОСТ 54858–2011 «Конструкции фасадные светопрозрачные. Метод определения приведенного сопротивления теплопередаче» и ISO 15099 «Thermal performance of windows, doors and shading devices – Detailed calculations» (ISO 15099 «Теплотехнические свойства окон, дверей и солнцезащитных устройств. Процедуры подробного расчета») позволяют корректировать коэффициенты теплоотдачи наружной поверхности с учетом изменения скорости наружного ветра при изменении высоты здания, т. е. фактические значения коэффициентов теплоотдачи наружной и внутренней поверхностей могут существенно отличаться от приведенных в нормативных документах.

Для наглядности определения теплотехнических показателей рассмотрим некоторое здание высотой более 600 м, расположенное в климатических условиях Северо-Западного региона РФ. В качестве значимых параметров внешнего микроклимата при-

нимаются наружная температура, скорость ветра, коэффициент теплоотдачи наружной поверхности и значимые параметры внутреннего микроклимата – внутренняя температура воздуха, влажность и коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности.

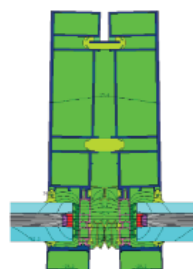
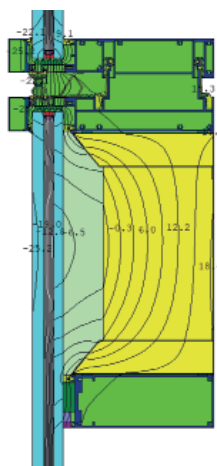
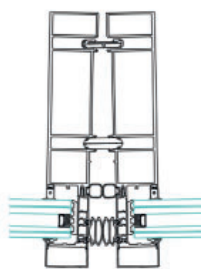
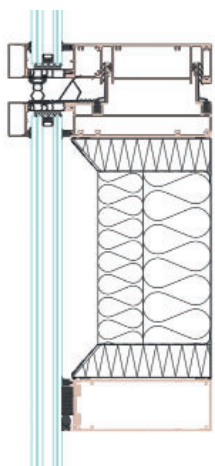
Также необходимо учесть, что КФС являются малоинерционными ограждающими конструкциями, именно поэтому на стационарный режим они могут выходить за кратковременный интервал времени, например в течение суток. При этом, вероятно, более технически достоверным и актуальным было бы использовать температуру наиболее холодных суток. Температура наиболее холодных суток с обеспеченностью 0,98 является самой низкой температурой, за исключением минимальной температуры за отопительный период.

На основании учета приведенных значимых параметров микроклимата, внутреннего и наружного воздуха была составлена табл. 1 с анализом климатических характеристик для условий региона строительства. На основании данных, представленных в табл. 1, выполнен ряд расчетов.

Рассмотрим вариант технического решения и выполним для него ряд расчетов для наглядного отображения влияния параметров микроклимата на характеристики КФС. Температуру внутреннего воздуха примем равной  $t_{в} = +20^{\circ}\text{C}$  с учетом требований ГОСТ 30494–2011.

Влажность внутреннего воздуха принимается согласно п. 5.7 СП 50.13330.2012 равной 50%, что соответствует значениям 30494–2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» как находящимся в допустимом интервале. Изменения, вносимые в СП 50.13330.2012 в течение последних лет, не дают возможности однозначно задать требования по влажности внутреннего воздуха и

могут вступать в противоречие с техническим заданием на проектирование конкретного объекта строительства. Поскольку требования СП 50.13330.2012, согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 28.05.2021 № 815 «Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» и постановлению Пра-



**Рис. 1.** Вертикальный и горизонтальный разрезы конструкции модульного фасада с однокамерным стеклопакетом

**Fig. 1.** Vertical and horizontal sections of the modular facade structure with single-chamber double-glazed windows

**Рис. 2.** Температурные поля вертикального и горизонтального разрезов конструкции модульного фасада с однокамерным стеклопакетом

**Fig. 2.** Temperature fields of vertical and horizontal sections of the modular facade structure with single-chamber double-glazed windows

Таблица 1  
Table 1

**Климатические данные теплотехнических расчетов для различных условий**  
**Climatic data of thermal engineering calculations for various conditions**

Высота, м	Скорость ветра, м/с	Температура пятидневки обеспеченностью 0,98, °С	Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности $\alpha_{Л}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности $\alpha_{к}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С) Наветренная	Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности $\alpha_{к}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С) Подветренная	Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности $\alpha_{к}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С) (Формула Франка)	Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности $\alpha_{н}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)
Исходные климатические данные теплотехнических расчетов для условий наиболее холодной пятидневки региона строительства							
10	4,8	-27	7,872	19,9	8,8	20,54	28,41
300	13,06	-30	7,67	19,9	11,94	39,61	47,28
600	14,5	-33	7,51	19,9	12,49	42,42	49,93
Исходные климатические данные теплотехнических расчетов региона строительства за январь							
10	3,7	-6,9	9,278	19,9	8,39	17,32	26,59
300	10,06	-9,9	9,041	19,9	10,8	33,37	42,41
600	11,2	-12,9	8,819	19,9	11,24	35,81	44,63
Исходные климатические данные теплотехнических расчетов для условий наиболее холодных суток региона строительства							
10	4,8	-30	7,67	19,9	8,8	20,54	28,21
300	13,06	-33	7,461	19,9	11,94	39,61	47,07
600	14,5	-36	7,266	19,9	12,49	42,42	49,68

ительства РФ № 914 от 20.05.2022 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 28 мая 2021 г. № 815», более не являются обязательными, целесообразно в ТЗ на проектирование ссылаться в первую очередь на проектируемые параметры внутреннего микроклимата, а также на параметры, находящиеся в оптимальном диапазоне (ГОСТ 30494–2011). Таким образом, температура точки росы для оценки соответствия конструкции требованиям п. 5.7 СП 50.13330.2012 составляет  $t_p=9,28^{\circ}\text{C}$ .

Для расчета теплотехнических характеристик центральной части стеклопакета и изотерм использовался программный комплекс Window-Therm, разработанный NFRS при участии LBLN. В расчете учтен однокамерный стеклопакет СПО 17CM4-16AR-CM13CM с дистанционной рамкой TGI.

На рис. 1 представлено решение конструкции модульного фасада с однокамерным стеклопакетом, которое было принято для исследования влияния климатических параметров микроклимата на КФС.

В табл. 2 приведена минимальная температура на внутренних поверхностях элементов на рассматриваемом узле, полученная в результате расчетов при разных климатических параметрах.

В результате анализа выполненных теплотехнических расчетов видно, что при стандартных условиях строительства конструкция в данном техническом решении, даже с использованием в качестве светопрозрачного заполнения однокамерных стеклопакетов, полностью удовлетворяет требованиям п. 5.7 СП 50.13330.2012. По результатам расчета для условий наиболее холодной пятидневки, наиболее холодных суток и за наиболее холодный месяц конструктивное решение также удовлетворяет требованиям п. 5.7 СП 50.13330.2012.

Таблица 2  
Table 2

**Результаты теплотехнических расчетов**  
**Results of thermal engineering calculations**

Высотная отметка	Сопротивление теплопередаче центральной зоны стеклопакета $R_{0,II}$ , м <sup>2</sup> ·°С/Вт	Минимальная температура на непрозрачной части конструкции $t_{н}$ , °С	Минимальная температура на светопрозрачной части конструкции $t_{сп}$ , °С
1. Климатические условия при наиболее холодной пятидневке с обеспеченностью 0,98 согласно СП 131.13330.2020			
–	0,723	+13,7	+7,7
2. Климатические данные теплотехнических расчетов для условий наиболее холодной пятидневки региона строительства, табл. 1			
0	0,676	+13,5	+7,3
300	0,644	+12,9	+6
600	0,63	+12,5	+5
3. Климатические данные теплотехнических расчетов для условий наиболее холодных суток региона строительства, табл. 1			
0	0,663	+13,1	+6,4
300	0,632	+12,5	+5
600	0,619	+12	+4
4. Климатические данные теплотехнических расчетов региона строительства за январь, табл. 1			
0	0,806	+16,2	+13,2
300	0,762	+16	+12,1
600	0,738	+15,5	+11,2

### Выводы

Существующая на сегодняшний день нормативная база в области КФС для высотных зданий не позволяет четко и однозначно задать корректные исходные данные для их проектирования.

При подготовке технического задания для проектирования КФС для высотных зданий необходимо проведение глубокого анализа климатических

параметров региона строительства, в том числе с привлечением данных метеостанций региона строительства.

Проблема проектирования КФС для высотных зданий кроется не в методике расчета, а в первую очередь в выбранной конструкции, корректности выбора технического решения и грамотном выборе условий эксплуатации.

При проектировании ограждающих конструкций для высотных зданий необходимо проводить детальный анализ всех исходных параметров и корректно задавать исходные климатические характеристики.

### Список литературы

1. Елдашев Ю.А., Сесюнин С.Г. Влияние процесса теплообмена у наружной поверхности стены на температуру внутренней поверхности оконного блока // *Жилищное строительство*. 2007. № 8. С. 25–27.
2. Майоров В.А. Передача теплоты через стеклопакеты // *Светопрозрачные конструкции*. 2015. № 1. С. 22–31.
3. Константинов А.П., Крутов А.А., Тихомиров А.М. Оценка теплозащитных характеристик оконных блоков из ПВХ профилей в зимний период эксплуатации // *Строительные материалы*. 2019. № 8. С. 65–72. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-65-72>
4. Melnikova I., Boriskina I. Modern translucent structures in multistory residential buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 022021. DOI: [10.1088/1757-899X/365/2/022021](https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/2/022021)
5. Константинов А.П., Окулов А.Ю. Нормирование технико-эксплуатационных характеристик оконных конструкций. Современная ситуация и перспективы развития // *Жилищное строительство*. 2021. № 11. С. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-11-3-9>
6. Stetsky S.V., Larionova K.O. Assessment of the insolation duration for the facades of buildings and adjacent territories under certain parameters of their development // *Light and Engineering*. 2021. Vol. 29. № 5 (1), pp. 28–34. DOI: [10.33383/2021-069](https://doi.org/10.33383/2021-069)
7. Крутов А.А., Константинов А.П. Требуемое сопротивление теплопередаче светопрозрачных ограждающих конструкций исходя из обеспечения комфортных условий // *Жилищное строительство*. 2021. № 11. С. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-11-14-20>
8. Banionis K., Kuzmina J., Burlingis A., Ramanauskas J., Pauktys V. The Changes in Thermal Transmittance of Window Insulating Glass Units Depending on Outdoor Temperatures in Cold Climate Countries. *Energies*. 2021. No. 14 (6). 169. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14061694>
9. Верховский А.А., Константинов А.П., Смирнов В.А. Стандартизация и требования нормативной документации к светопрозрачным фасадным конструкциям на территории Российской Федерации // *Жилищное строительство*. 2020. № 6. С. 35–40. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2020-6-35-40>

### References

1. Eldyshev Yu.A., Sesyunin S.G. The influence of the heat transfer process at the outer surface of the wall on the temperature of the inner surface of the window block. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2007. No. 8, pp. 25–27. (In Russian).
2. Mayorov V.A. Heat transfer through double-glazed windows. *Svetoprozrachnye konstruksii*. 2015. No. 1, pp. 22–31. (In Russian).
3. Konstantinov A.P., Krutov A.A., Tikhomirov A.M. Assessment of the PVC windows thermal characteristics in winter. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 8, pp. 65–72. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-65-72>
4. Melnikova I., Boriskina I. Modern translucent structures in multistory residential buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 022021. DOI: [10.1088/1757-899X/365/2/022021](https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/2/022021)
5. Konstantinov A.P., Okulov A.Y. Standardization of technical and operational characteristics of window structures. Current situation and development respects. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2021. No. 11, pp. 3–9. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-11-3-9>
6. Stetsky S.V., Larionova K.O. Assessment of the insolation duration for the facades of buildings and adjacent territories under certain parameters of their development. *Light and Engineering*. 2021. Vol. 29. No. 5 (1), pp. 28–34. DOI: [10.33383/2021-069](https://doi.org/10.33383/2021-069)
7. Krutov A.A., Konstantinov A.P. The required resistance to heat transfer of translucent enclosing structures based on the comfortable conditions provision. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2021. No. 11, pp. 14–20. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-11-14-20>
8. Banionis K., Kuzmina J., Burlingis A., Ramanauskas J., Pauktys V. The Changes in Thermal Transmittance of Window Insulating Glass Units Depending on Outdoor Temperatures in Cold Climate Countries. *Energies*. 2021. No. 14 (6). 169. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14061694>
9. Verkhovsky A.A., Konstantinov A.P., Smirnov V.A. Standardization and requirements of normative documentation for curtain walls in the Russian Federation. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2020. No. 6, pp. 35–40. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2020-6-35-40>

УДК 699.844.1

DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-12-17>С.Н. ОВСЯННИКОВ<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук (ovssn@tsuab.ru)  
А.С. САМОХВАЛОВ<sup>1,2</sup>, ведущий инженер (tomsk117@mail.ru)<sup>1</sup> Томский государственный архитектурно-строительный университет (634003, г. Томск, Соляная пл., 2)<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, Россия, Москва, Локомотивный проезд, 21)

## Звукоизоляция однослойных остеклений, одно- и двухкамерных стеклопакетов

Представлен анализ известных аналитических решений задачи расчета звукоизоляции одно-, двух- и трех-слойных остеклений в сопоставлении с результатами лабораторных измерений. Использована волновая теория прохождения звука через однослойные и многослойные ограждающие конструкции с воздушными промежутками. На основе расчетов звукоизоляции однослойных остеклений показано, что теория, заложенная в основу методики ГОСТ Р ЕН 12354-1–2012 «Акустика зданий. Методы расчета акустических характеристик зданий по характеристикам их элементов. Ч. 1. Звукоизоляция воздушного шума между помещениями», наиболее адекватно учитывает процессы нерезонансной и резонансной звукопередачи. Ее использование в постановке моделей прохождения звука через двойное и тройное остекление с учетом внутренних потерь и влияния резонансных процессов позволило получить аналитические решения задачи звукоизоляции однокамерных и двухкамерных стеклопакетов, показавшие хорошую сходимость с результатами эксперимента. Предложенная методика расчета звукоизоляции через одно- и двухкамерные стеклопакеты может быть использована в инженерных расчетах после дополнительных исследований внутренних потерь в многослойных остеклениях, а также дополнительных измерений ряда «стандартных» типов остекления для верификации методики.

**Ключевые слова:** стеклопакеты, многослойные остекления, звукоизоляция, инерционное и резонансное прохождение звука.

Работа выполнена при поддержке ФНИ РААСН, проект 3.1.4.6.

**Для цитирования:** Овсянников С.Н., Самохвалов А.С. Звукоизоляция однослойных остеклений, одно- и двухкамерных стеклопакетов // *Жилищное строительство*. 2023. № 12. С. 12–17.  
DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-12-17>

S.N. OVSYANNIKOV<sup>1,2</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (ovssn@tsuab.ru),  
A.S. SAMOKHVALOV<sup>1,2</sup>, Leading Engineer (tomsk117@mail.ru)<sup>1</sup> Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering (2, Solyanaya Square, Tomsk, 634003, Russian Federation)<sup>2</sup> Scientific-Research Institute of Building Physics of RAACS (21, Lokomotivniy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

### Sound Insulation of Single-Layer Glazing, Single- and Double-Glazed Windows

The analysis of known analytical solutions to the problem of calculating transmission the sound insulation of one- two- and three-layer glazing in comparison with the results of laboratory measurements is presented. The wave theory of sound transmission through single-layer and multi-layer enclosing structures with air gaps is used. Based on calculations of sound insulation of single-layer glazing, it is shown that the theory underlying the methodology of GOST R EN 12354-1–2012 “Acoustics of buildings. Methods for calculating the acoustic characteristics of buildings based on the characteristics of their elements. Part 1. Sound insulation of air noise between rooms”, most adequately takes into account the processes of non-resonant and resonant sound transmission. Its use in the formulation of models of sound transmission through double and triple glazing, taking into account internal losses and the influence of resonant processes, made it possible to obtain analytical solutions to the problem of sound insulation of single-chamber and double-chamber double-glazed windows, which showed good convergence with the experimental results. The proposed method for calculating sound insulation through single- and double-chamber double-glazed windows can be used in engineering calculations after additional studies of internal losses in multilayer glazing, as well as additional measurements of a number of “standard” types of glazing to verify the methodology.

**Keywords:** double-glazed windows, multilayer glazing, sound insulation, inertial and resonant sound transmission.

The work was carried out with the support of the FNI RAACS, project 3.1.4.6.

**For citation:** Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S. Sound insulation of single-layer glazing, single- and double-glazed windows. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2023. No. 12, pp. 12–17. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-12-17>

В зарубежных работах, посвященных исследованию звукоизоляции двойных и тройных ограждений, в том числе светопрозрачных [1–3], представлены решения, основанные на теории Л. Кремера с учетом резонансов «масса–упругость–масса» которые, однако, не согласуются с результатами измерений звукоизоляции таких конструкций [4]. Системной ошибкой этих решений является рост звукоизоляции двойных и тройных остеклений с темпом 12–18 до 24 дБ на октаву и достижение чрезвычайно высоких расчетных значений звукоизоляции (до 100 дБ), что никак не подтверждается практикой измерений. Подробный анализ и постановка адекватных решений задачи расчета одно-, двух- и трехслойных светопрозрачных конструкций выполнены в работе [5]. В этой же работе предложены модели расчета одно-, двух и трехслойных остеклений. По результатам дальнейших измерений и расчетов звукоизоляции одно- и многослойных светопрозрачных конструкций в настоящей работе предлагается дальнейшее развитие методики расчета звукоизоляции одинарных, двойных и тройных остеклений.

### Резонансы многослойных светопрозрачных конструкций

В расчетах звукоизоляции особое значение имеют значения резонансных частот. В одинарных пластинах остекления и в каждом из остеклений многослойных конструкций возникают резонансы волнового совпадения. Для пластины конечных размеров, излучающей звук в реверберационное помещение, эта частота не зависит от угла падения, она названа «критической», или «граничной»:

$$f_c = \frac{\sqrt{3} \cdot c_o^2}{\pi \cdot h \cdot c_l}, \quad (1)$$

где  $c_o$  – скорость звука в воздухе, м/с;  $c_l = 5400$  – скорость продольной волны в стекле, м/с;  $h$  – толщина ограждения, м. Так, для стекла толщиной 4 мм критическая частота равна 2950 Гц, для стекла 6 мм – 1967 Гц, для стекла 10 мм – 1180 Гц. Для многослой-



Рис. 1. Колебательная система с одной степенью свободы с 2 массами и 1 упругим элементом  
Fig. 1. An oscillatory system with one degree of freedom with 2 masses and 1 elastic element

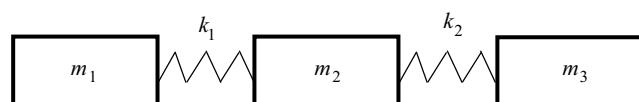


Рис. 2. Колебательная система с двумя степенями свободы с 3 массами и 2 упругими элементами  
Fig. 2. An oscillatory system with two degrees of freedom with 3 masses and 2 elastic elements

ных светопрозрачных конструкций в области низких частот возникают резонансы типа «масса–упругость–масса», вычисляемые на основе теории колебаний. Двойное остекление представим как систему с одной степенью свободы, с двумя массами  $m_1$  и  $m_2$ , одним упругим элементом жесткостью  $k$  (рис. 1).

Составив и решив систему уравнений баланса упругих и инерционных сил для каждой из масс, можем получить известное выражение для определения резонансной частоты:

$$f_o = 59,55 \cdot \sqrt{\frac{(m_1 + m_2)}{d \cdot m_1 \cdot m_2}}. \quad (2)$$

В табл. 1 даны результаты расчета резонансных частот наиболее часто встречающихся однокамерных стеклопакетов.

Как видим, все однокамерные стеклопакеты имеют достаточно высокие значения резонансных частот, которые попадают в нормируемый диапазон от 100 до 3150 Гц.

Моделью тройного остекления является колебательная система с тремя массами  $m_1$ ,  $m_2$  и  $m_3$ , двумя упругими элементами с жесткостью  $k_1$ ,  $k_2$  (рис. 2).

Расчет собственных частот для колебательной системы с тремя массами и двумя упругими элементами с жесткостью (рис. 2) произведем, также составив

Таблица 1  
Table 1

Результаты расчета резонансных частот однокамерных стеклопакетов  
The results of the calculation of the resonant frequencies of single-chamber double-glazed windows

Формула остекления	Резонансные частоты, Гц
4+9+4	283
4+10+4	268
4+12+4	245
4+14+4	227
4+16+4	212
6+16+4	194
6+16+6	173
8+16+4	183
10+16+4	177
10+16+8	142

Таблица 2  
Table 2

Резонансные частоты для двухкамерных стеклопакетов  
Resonant frequencies for double-glazed windows

Формула остекления	Резонансные частоты, Гц
4+10+4+10+4	188; 326
4+12+4+12+4	172; 298
4+14+4+14+4	159; 275
4+16+4+16+4	149; 258
4+10+4+16+4	163; 298
6+10+4+16+6	134; 280

систему уравнений баланса упругих и инерционных сил для каждой из масс. Из решения системы уравнений получим два значения резонансной частоты:

$$f_1 = 59,55 \cdot \sqrt{\frac{a+b - \sqrt{(a-b)^2 + 4 \frac{m_1^2 m_3^2}{d_1 d_2}}}{2m_1 m_2 m_3}}; \quad (2.1)$$

$$f_2 = 59,55 \cdot \sqrt{\frac{a+b + \sqrt{(a-b)^2 + 4 \frac{m_1^2 m_3^2}{d_1 d_2}}}{2m_1 m_2 m_3}}; \quad (2.2)$$

где  $a = \frac{m_3(m_1 + m_2)}{d_1}$ ;  $b = \frac{m_1(m_2 + m_3)}{d_2}$ ;  $d_1, d_2$  – толщины воздушных промежутков.

Похожее решение дано в работе [1] и в работах Р.Ю. Винокура [6–8]. Результаты расчета резонансных частот для некоторых типов двухкамерных стеклопакетов даны в табл. 2.

### Теоретические основы расчета звукоизоляции однослойных и многослойных светопрозрачных конструкций

Расчеты звукоизоляции сводятся к определению коэффициентов прохождения инерционных волн (коэффициентов нерезонансного прохождения звука)  $\tau_f$  и коэффициентов резонансного прохождения звука  $\tau_r$ .

Для двойных конструкций, состоящих из двух пластин с воздушным промежутком между ними, М.С. Седов предложил модель прохождения звука, учитывающую энергию, проходящую через конструкцию в целом с учетом резонанса «масса–упругость–масса» и через отдельные пластины, как самостоятельные колебательные системы. Общий коэффициент прохождения звука через двойную конструкцию М.С. Седовым представлен как:

$$\tau = \tau_f + \tau_r + \tau_{1f} \cdot \tau_{2f} + \tau_{1r} \cdot \tau_{2r}, \quad (3)$$

где  $\tau_f, \tau_r$  – коэффициенты нерезонансного и резонансного прохождения звука через конструкцию из двух пластин с воздушным промежутком;  $\tau_{1f}, \tau_{2f}$  – коэффициенты нерезонансного прохождения через одинарные первую и вторую пластины;  $\tau_{1r}, \tau_{2r}$  – коэффициенты резонансного прохождения через одинарные первую и вторую пластины.

Однако, как показывает практика расчетов, произведения коэффициентов прохождения через отдельные пластины на порядок меньше соответствующих коэффициентов прохождения через двойную конструкцию, тем более произведения коэффициентов прохождения для трех и более стеклянных пластин, поэтому, как оказалось, достаточно точный результат можем получить по формуле:

$$\tau = \tau_f + \tau_r, \quad (4)$$

### Расчет звукоизоляции однослойных остеклений

В зарубежной литературе можно увидеть различные решения задачи звукоизоляции однослойной пластины при диффузном падении звука. В предыдущей статье [5] показано решение задач расчета звукоизоляции одинарного стекла, двойных и тройных остеклений на основе этой теории. Последующие измерения и расчеты показали на необходимость коррекции методики расчета и ее развития для расчета более сложных светопрозрачных конструкций. Наиболее корректный результат расчета однослойного остекления дает методика ГОСТ Р ЕН 12354-1–2012, основанная на работах Е. Севелла, Г. Майданика, Р. Джосса и Дж. Ламура. Коэффициенты резонансного прохождения энергии звука определяются по формулам:

$$\tau_r = \frac{\rho_o^2 \cdot c_o^2}{\pi^2 \cdot m^2 \cdot f^2} \cdot \frac{f_c}{f} \cdot \frac{\pi \cdot \sigma_r^2}{2 \cdot \eta_{tot}}, \quad f > f_c; \quad (5)$$

$$\tau_r = \frac{\rho_o^2 \cdot c_o^2}{\pi^2 \cdot m^2 \cdot f^2} \cdot \frac{\pi \cdot \sigma_r^2}{2 \cdot \eta_{tot}}, \quad f = f_c; \quad (6)$$

$$\tau_r = \frac{\rho_o^2 \cdot c_o^2}{\pi^2 \cdot m^2 \cdot f^2} \cdot \frac{(a+b)^2}{a^2 + b^2} \cdot \sqrt{\frac{f_c}{f}} \cdot \frac{\sigma_r^2}{\eta_{tot}}, \quad f < f_c; \quad (7)$$

коэффициенты нерезонансного прохождения звука:

$$\tau_f = \frac{\rho_o^2 \cdot c_o^2}{\pi^2 \cdot m^2 \cdot f^2} \cdot 2\sigma_f, \quad f < f_c; \quad (8)$$

$$\tau_f = 0, \quad f \geq f_c, \quad (9)$$

где  $f$  – частота, Гц;  $m = \rho \cdot h$  – поверхностная масса конструкции, кг/м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность материала ограждения, кг/м<sup>3</sup>;  $h$  – толщина ограждения, м;  $a$  и  $b$  – размеры ограждения в плане, м;  $\rho_o \cdot c_o = 410$  – акустическое сопротивление воздуха, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $\sigma_r$  – резонансный коэффициент излучения свободных изгибных волн;  $\sigma_f$  – инерционный коэффициент излучения вынужденных изгибных волн;  $\eta_{tot}$  – общий коэффициент потерь, учитывающий потери в материале на излучение и по контуру примыкающих элементов.

Инерционный коэффициент излучения определяется в зависимости от соотношения размеров пластины:

$$\sigma_f = 0,5 \cdot \left[ \ln \left( \frac{2\pi f}{c_o} \cdot \sqrt{a \cdot b} \right) - \Lambda \right], \quad (10)$$

$$\text{где } \Lambda = -0,964 - \left( 0,5 + \frac{b}{\pi a} \right) \cdot \ln \frac{b}{a} + \frac{5b}{2\pi a} - \frac{c_o^2}{16a \cdot b \cdot \pi^3 \cdot f^2}.$$

Как показывают расчеты, при любых размерах пластины во всем диапазоне частот поправка  $\Lambda \approx -0,17$  и только на самой низкой частоте 100 Гц в зависимости от соотношения размеров  $\Lambda = -0,18 \dots -0,19$ , поэтому в дальнейших расчетах:

$$\sigma_f = 0,5 \cdot \left[ \ln \left( \frac{2\pi f}{c_o} \cdot \sqrt{a \cdot b} \right) + 0,17 \right]. \quad (11)$$

Коэффициент излучения свободных волн (резонансный коэффициент излучения) вычисляется по формулам Г. Майданика:

– на частотах выше критической

$$\sigma_r = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{f_c}{f}}} \leq 2,0, \quad f > f_c; \quad (12)$$

– в полосе критической частоты

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{a}{\lambda_{bc}}} + \sqrt{\frac{b}{\lambda_{bc}}} \leq 2,0, \quad f = f_c, \quad (13)$$

где  $\lambda_{bc} = \frac{\pi \cdot h \cdot c_l}{\sqrt{3} \cdot c_o}$  – длина изгибной волны в пластине на критической частоте;

– на частотах ниже критической

$$\sigma_r = \frac{4c_o}{f_c} \cdot \delta_1 + \delta_2, \quad f < f_c, \quad (14)$$

$$\text{где } \delta_1 = \frac{(1 - \lambda^2) \cdot \ln\left(\frac{1 + \lambda}{1 - \lambda}\right) + 2\lambda}{4\pi^2 (1 - \lambda^2)^{1.5}}; \quad (15)$$

$$\delta_2 = \frac{8c_o^2 \cdot (1 - 2\lambda^2)}{f_c^2 \pi^4 a \cdot b \cdot \lambda \cdot \sqrt{1 - \lambda^2}} \text{ при } f < \frac{1}{2} f_c; \quad (16)$$

$$\delta_2 = 0 \text{ при } f > \frac{1}{2} f_c. \quad (17)$$

Вычислив коэффициенты резонансного и нерезонансного прохождения звука в третьоктавных полосах частот, определим общий коэффициент прохождения:  $\tau = \tau_f + \tau_r$ , и звукоизоляцию:

$$R = 10 \lg \tau^{-1}. \quad (18)$$

Результаты вычисления звукоизоляции однослойного остекления толщиной 4 мм с размерами 1×1 м представлены на рис. 3 в сравнении с результатами измерений в реверберационных камерах Томского

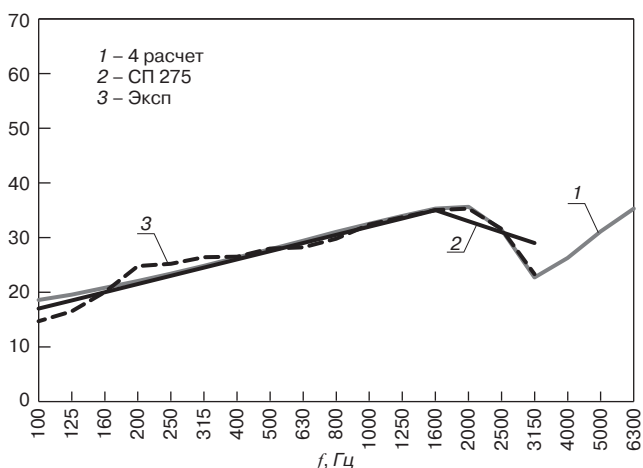


Рис. 3. Звукоизоляция остекления с размерами 1×1 м, толщиной 0,004 м: 1 – по формулам (4–9, 18); 2 – по графоаналитической методике СП 275.1325800.2016; 3 – эксперимент

Fig. 3. Sound insulation of glazing with dimensions of 1.0×1.0 m and a thickness of 0.004 m: 1 – according to the (4–9, 18); 2 – according to the graphic-analytical technique SP 275.1325800.2016; 3 – experiment

ГАСУ и расчетами по СП 275.1325800.2016 «Конструкции ограждающие жилых и общественных зданий. Правила проектирования звукоизоляции».

Решение задачи звукоизоляции однослойного остекления хорошо сходится как с расчетом графоаналитическим методом по СП 275.1325800.2016, так и с результатами лабораторных измерений. Учет нерезонансной звукопередачи существенно улучшает расчеты звукоизоляции на низких частотах по сравнению с известными решениями, а учет резонансной звукопередачи – в области средних частот.

### Расчет звукоизоляции двойных остеклений (однокамерных стеклопакетов)

На звукоизоляцию двойных остеклений влияет увеличение поверхностной массы конструкции и резонансы: на низких частотах – резонанс типа «масса–упругость–масса», на высоких частотах резонанс волнового совпадения пластин остекления.

Методика расчета двойных остеклений включает в себя расчеты инерционных и резонансных коэффициентов излучения отдельных пластин по формулам (5–9), а затем вычисление коэффициентов прохождения через двойную конструкцию.

Для однокамерного стеклопакета с формулой остекления 4+12+4 (два стекла по 4 мм и воздушный промежуток 12 мм) резонансная частота  $f_o=245$  Гц. Критическая частота для стеклянной пластины толщиной 4 мм составляет  $f_c=2950$  Гц. В области резонансов следует учитывать общий коэффициент внутренних потерь  $\eta_{tot} \approx 0,2$  для всей системы, состоящей из двух стекол и воздушного промежутка.

Инерционный коэффициент прохождения на частотах в области резонанса «масса–упругость–масса»:

$$\tau_f = \frac{\rho_o^2 \cdot c_o^2}{\pi^2 \cdot (m_1 + m_2)^2 \cdot f^2} \cdot \frac{2 \cdot \sigma_f}{\left[1 - \left(\frac{f}{f_o}\right)^2\right]^2 + 2 \frac{f}{f_o} \eta_{tot}}, \quad f \leq 1,25 f_o \quad (19)$$

За пределами резонанса на частотах влияние резонанса «масса–упругость–масса» меньше, но начинает влиять резонанс волнового совпадения, а коэффициент инерционного прохождения звука:

$$\tau_f = \frac{\rho_o^2 \cdot c_o^2}{\pi^2 \cdot (m_1 + m_2)^2 \cdot f^2} \cdot \frac{3 \cdot \sigma_f}{\left(1 - \frac{f}{f_o}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{f}{f_c}\right)^2}, \quad 1,6 f_o \leq f < f_c \quad (20)$$

Резонансные коэффициенты прохождения через двойное остекление определим на частотах ниже критической:

$$\tau_r = \frac{\rho_o^2 \cdot c_o^2}{\pi^2 \cdot m^2 \cdot f^2} \cdot \frac{(a + b)^2}{a^2 + b^2} \cdot \frac{f_c}{f} \cdot \frac{\sigma_r}{\eta_{tot}}, \quad f < f_c \quad (21)$$

В полосе критической частоты:

$$\tau_r = \frac{\rho_o^2 \cdot c_o^2}{\pi \cdot (m_1 + m_2)^2 \cdot f^2} \cdot \frac{\sigma_r}{2 \cdot \eta_{tot}}, \quad f = f_c \quad (22)$$

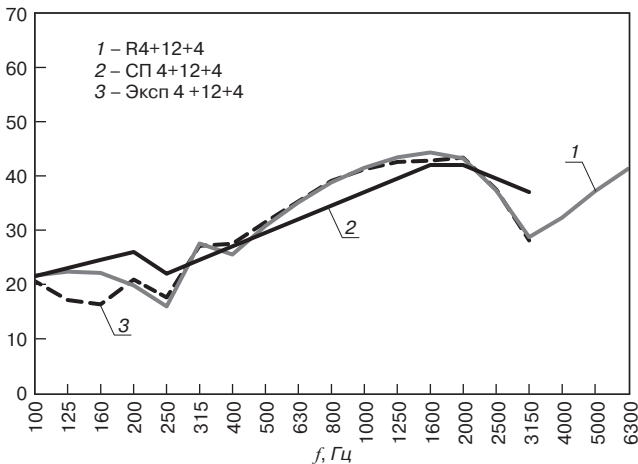


Рис. 4. Звукоизоляция двойного остекления с размерами 1×1 м, толщиной 0,004 м с воздушным промежутком 12 мм: 1 – по формулам (18–23); 2 – по графоаналитической методике СП 275.1325800.2016; 3 – эксперимент

Fig. 4. Sound insulation of double glazing with dimensions of 1×1 m and a thickness of 0.004 m and air gap 12 mm: 1 – according to the (18–23); 2 – according to the graphic-analytical technique SP 275.1325800.2016; 3 – experiment

На частотах выше критической:

$$\tau_r = \frac{\rho_o^2 \cdot c_o^2}{\pi \cdot (m_1 + m_2)^2 \cdot f^2} \cdot \frac{f_c}{f} \cdot \frac{\sigma_r^2}{2 \cdot \eta_{tot}}, \quad f > f_c. \quad (23)$$

Во всех поддиапазонах частот определим суммарный коэффициент прохождения как сумму инерционных и резонансных коэффициентов, а затем звукоизоляцию по формуле (18).

В расчетах используются коэффициенты излучения звука для одной стеклянной пластины, полученные для однослойной конструкции по формулам (11–17). На рис. 4 покажем график расчетной звукоизоляции двойного остекления по формуле 4+12+4 в сравнении с результатами измерений в реверберационных камерах ТГАСУ и расчетом по СП 275.1325800.2016.

Как видим из графиков, расчетные и измеренные значения звукоизоляции весьма хорошо сходятся, кроме самых низких частот, что можно объяснить низкой диффузностью звуковых полей в реверберационных камерах ТГАСУ вследствие недостаточности их объема.

#### Расчет звукоизоляции тройных остеклений (двухкамерных стеклопакетов)

Расчет инерционного и резонансного коэффициентов излучения для отдельных стеклянных пластин произведем по формулам (5–9). Определим две резонансные частоты типа «масса – упругость – масса» по формулам (2.1) и (2.2). Так, для стеклопакета 4+12+4+12+4 эти частоты составят  $f_1=172$  Гц и  $f_2=298$  Гц.

Инерционный коэффициент прохождения звука через двухкамерный стеклопакет из трех стеклянных пластин с двумя воздушными промежутками запи-

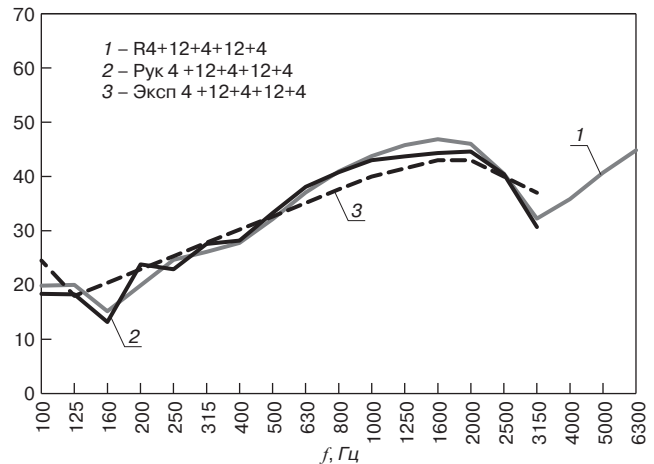


Рис. 5. Звукоизоляция трехслойного остекления с размерами 1×1 м, толщиной 0,004 м и воздушными промежутками по 12 мм: 1 – расчет по формулам (18, 24–28); 2 – по графоаналитической методике Руководства по расчету и проектированию звукоизоляции ограждающих конструкций зданий; 3 – эксперимент

Fig. 5. Sound insulation of three-layer glazing with dimensions of 1×1 m, thickness 0.004 m and air gaps of 12 mm: 1 – calculation according to the (18, 24–28); 2 – according to the graphic-analytical technique; 3 – experiment

шем с учетом общего коэффициента потерь системы  $\eta_{tot}$  в области резонансов, уменьшив зависимость от частоты за их пределами.

На частотах  $f \leq 1,25f_2$ :

$$\tau_f = \frac{\rho_o^2 \cdot c_o^2}{\pi^2 \cdot (m_1 + m_2 + m_3)^2 \cdot f^2} \cdot \frac{2\sigma_f}{\left[ \left( \frac{f}{f_1} \right)^2 - 1 \right]^2 \cdot \left[ \left( \frac{f}{f_2} \right)^2 - 1 \right]^2 + 2\eta_{tot} \cdot \frac{f^2}{f_1 \cdot f_2}}. \quad (24)$$

На частотах  $f_2 < f < f_c$ :

$$\tau_f = \frac{\rho_o^2 \cdot c_o^2}{\pi^2 \cdot (m_1 + m_2 + m_3)^2 \cdot f^2} \cdot \frac{2\sigma_f}{\left( 1 - \frac{f}{f_2} \right)^2 \cdot \left( 1 - \frac{f}{f_c} \right)^2}. \quad (25)$$

Резонансный коэффициент прохождения на частотах ниже критической определим по формуле:

$$\tau_r = \frac{\rho_o^2 \cdot c_o^2}{\pi^2 \cdot (m_1 + m_2 + m_3)^2 \cdot f^2} \cdot \sqrt{\frac{f_1 \cdot f_2 \cdot f_c}{f^3}} \cdot \frac{2\sigma_r}{\eta_{tot}}, \quad f < f_c. \quad (26)$$

В полосе критической частоты:

$$\tau_r = \frac{\rho_o^2 \cdot c_o^2}{\pi \cdot (m_1 + m_2 + m_3)^2 \cdot f^2} \cdot \frac{\sigma_r^2}{2 \cdot \eta_{tot}}, \quad f = f_c. \quad (27)$$

И на частотах выше критической:

$$\tau_r = \frac{\rho_o^2 \cdot c_o^2}{\pi \cdot (m_1 + m_2 + m_3)^2 \cdot f^2} \cdot \frac{f_c}{f} \cdot \frac{\sigma_r^2}{2 \cdot \eta_{tot}}, \quad f > f_c. \quad (28)$$

Суммарный коэффициент прохождения определим в каждом поддиапазоне как  $\tau = \tau_f + \tau_r$ , а звукоизоляцию как  $R = 10 \lg \tau^{-1}$ .

На рис. 5 представлены результаты расчета звукоизоляции конструкции трехслойного остекления с формулой остекления 4+12+4+12+4 (три стекла по 4 мм и два воздушных промежутка по 12 мм) и измерения звукоизоляции в реверберационных камерах ТГАСУ, а также расчета по методике Руководства по расчету и проектированию звукоизоляции

ограждающих конструкций зданий (М., НИИСФ Госстроя, 1983 г.).

Предлагаемая методика показывает удовлетворительную сходимость с результатами эксперимента. Расчет несложен, вычисления легко реализуются с использованием процедур Excel, что позволяет использовать предложенные выражения в инженерной практике.

### Выводы

Выполнены значительные объемы лабораторных измерений звукоизоляции остеклений, которые показали, что известные методики расчета светопрозрачных конструкций дают результаты, показывающие хорошую сходимость только для однослойных светопрозрачных конструкций, причем нерезонансная звукопередача имеет существенное значение в области низких и средних частот, а резонансная – в области средних и высоких частот. Для одно- и двухкамерных стеклопакетов фактический рост звукоизоляции на частотах выше резонанса «масса–упругость–масса» составляет в среднем 6,8–7,3 дБ/октава, а не 18–24 дБ/октава, как это представлено в некоторых отечественных и зарубежных источниках.

Важное значение имеет учет общих внутренних потерь в многослойных остеклениях, поэтому актуальной задачей является исследование внутренних потерь, потерь на излучение и потерь по контуру светопрозрачной конструкции в ряде поддиапазонов, особенно в резонансных областях частот.

Предложены аналитические выражения, позволяющие вычислить коэффициенты инерционного и резонансного прохождения звука через одно- и двухкамерные стеклопакеты; результаты расчета ряда конструкций показали хорошую сходимость с результатами лабораторных измерений. Вместе с тем; выявлена необходимость дополнительных экспериментальных исследований звукоизоляции для широкой линейки наиболее часто используемых стеклопакетов, причем конструкций со «стандартными» размерами 1250×1500 мм в соответствии с введенными в России ГОСТ Р ИСО 10140-2–2012, ГОСТ Р ИСО 10140-5–2012 и ГОСТ 26602.3.2016 с целью более тщательной верификации предлагаемой методики и использования полученных данных для определения звукоизоляции оконных конструкций и витражей, т. е. с учетом конструкций переплетов, размеров и прочих особенностей светопрозрачных конструкций.

### Список литературы / References

1. Tadeu A.J.B., Mateus D.M.R. Sound transmission through single, double and triple glazing. Experimental evaluation. *Applied Acoustics*. 2001. Vol. 62, pp. 307–325. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(00\)00032-3](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(00)00032-3)
2. Xin F.X., Lu T.J. Analytical modeling of sound transmission through clamped triple-panel partition separated by enclosed air cavities. *European Journal of Mechanics A/Solids*. 2011. Vol. 30, pp. 770–782. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2011.04.013>
3. Kurra S. Comparison of the models predicting sound insulation values of multilayered building elements. *Applied Acoustics*. 2012. Vol. 73, Iss. 6–7, pp. 575–589. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.11.008>
4. Овсянников С.Н., Самохвалов А.С. Окна в раздельных переплетах с высокой теплозвукоизоляцией // *Строительные материалы*. 2012. № 6. С. 42–43.
4. Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S. Windows in separate bindings with high heat and sound insulation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 6, pp. 42–43. (In Russian).
5. Овсянников С.Н., Самохвалов А.С., Лелюга О.В., Большанина Т.С. Расчеты звукоизоляции одно-, двух- и трехслойных светопрозрачных конструкций // *Жилищное строительство*. 2022. № 11. С. 29–35. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-11-29-35>
5. Ovsyannikov S.N., Samokhvalov A.S., Lelyuga O.V., Bolshanina T.S. Calculations of sound insulation of one-two- and three-layer translucent structures. *Zhilyshchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2022. No. 11, pp. 29–35. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-11-29-35>
6. Винокур Р.Ю. Об эффекте повышения звукоизоляции легких перегородок на низких частотах // *Акустический журнал*. 1983. Т. 29. № 3.
6. Vinokur R.Yu. On the effect of increasing the sound insulation of light partitions at low frequencies. *Akusticheskii zhurnal*. 1983. Vol. 29. No. 3. (In Russian).
7. Винокур Р.Ю. Расчет звукоизоляции окон жилых и общественных зданий: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1983. 157 с.
7. Vinokur R.Yu. Calculation of sound insulation of windows of residential and public buildings. Cand. Diss. (Engineering). 1983. Moscow, 157 p. (In Russian).
8. Винокур Р.Ю., Лалаев Э.М. Теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляционных стеклопакетов. В кн.: Борьба с шумом и звуковой вибрацией. М.: МДНТП, 1982. С. 62–67.
8. Vinokur R.Yu., Lalaev E.M. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya zvukoizolyatsionnykh steklopaketov. V kn.: Bor'ba s shumom i zvukovoi vibratsiei [Theoretical and experimental studies of soundproof double-glazed windows. In the book: Struggle against noise and sound vibration]. Moscow: MDNTP. 1982, pp. 62–67.

УДК 692.82

DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-18-21>

А.П. КОНСТАНТИНОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук (apkonst@yandex.ru),  
И.С. АКСЁНОВ<sup>1</sup>, инженер (ivanak1995@mail.ru); А.Е. ЕЛОХОВ<sup>2</sup>, инженер (info@passivrus.ru)

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

<sup>2</sup> ООО «Институт пассивного дома» (117405, г. Москва, ул. Кирпичные выемки, 2, корп. 1, эт. 4, пом. XII, оф. 407)

## Использование термографии для определения граничных условий теплообмена у внутренних поверхностей светопрозрачных ограждающих конструкций

*Представлен подход к определению граничных условий теплообмена у внутренних поверхностей светопрозрачных ограждающих конструкций (коэффициентов теплоотдачи) с использованием данных тепловизионной съемки исследуемых конструкций. Для реализации рассматриваемого подхода необходимо использовать дополнительную оснастку в виде листов бумаги. Лист бумаги устанавливается вплотную к перпендикулярно исследуемой поверхности конструкции. При этом профиль листа бумаги в точности повторяет геометрию исследуемой поверхности. По результатам тепловизионной съемки строятся термограммы и графики температуры на характерных участках внутренней поверхности светопрозрачной ограждающей конструкции. С их помощью определяется толщина пограничного слоя воздуха, примыкающего к внутренней поверхности светопрозрачной ограждающей конструкции. Эти данные используются в дальнейшем для расчета коэффициента теплообмена у внутренней поверхности конструкций. Представленный подход реализован в ходе натурных исследований условий теплообмена у внутренних поверхностей четырех окон из ПВХ профилей.*

**Ключевые слова:** светопрозрачная конструкция, окно, тепловая защита, коэффициент теплоотдачи, температурные поля, термография.

**Для цитирования:** Константинов А.П., Аксёнов И.С., Елохов А.Е. Использование термографии для определения граничных условий теплообмена у внутренних поверхностей светопрозрачных конструкций // *Жилищное строительство*. 2023. № 12. С. 18–21. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-18-21>

A.P. KONSTANTINOV<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (apkonst@yandex.ru),

I.S. AKSENOV<sup>1</sup>, Engineer (ivanak1995@mail.ru); A.E. ELOHOV<sup>2</sup>, Engineer (info@passivrus.ru)

<sup>1</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl'skoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

<sup>2</sup> LLC «Institute of Passive House» (2-1-4-X11-407, Kirpichnye vyemki street, Moscow, 117405, Russian Federation).

### The use of Thermography to Determine the Boundary Conditions of Heat Exchange on The Inner Surfaces of Translucent Enclosing Structures

The paper presents an approach to determining the boundary conditions of heat transfer (heat transfer coefficients) on the inner surfaces of translucent enclosing structures using thermal imaging data. To implement this approach, it is necessary to use additional equipment in the form of sheets of paper. A sheet of paper is installed close to and perpendicular to the investigated surface of the structure. At the same time, the profile of the sheet of paper exactly repeats the geometry of the surface under study. Based on the results of thermal imaging, thermograms and temperature graphs are constructed on characteristic areas of the inner surface of the translucent enclosing structure. They are used to determine the thickness of the boundary layer of air adjacent to the inner surface of the translucent enclosing structure. These data are used later to calculate the heat transfer coefficient at the inner surface of these structures. The presented approach was implemented in the course of field studies of heat transfer conditions at the internal surfaces of four PVC windows.

**Keywords:** translucent structure, window, thermal protection, heat transfer coefficient, temperature fields, thermography.

**For citation:** Konstantinov A.P., Aksenov I.S., Elohov A.E. The use of thermography to determine the boundary conditions of heat exchange on the inner surfaces of translucent enclosing structures. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2023. No. 12, pp. 18–21. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-18-21>

Современные типы светопрозрачных ограждающих конструкций, применяемые в массовом гражданском строительстве, все еще имеют относительно низкое приведенное сопротивление теплопередаче (как правило, не более 1 м<sup>2</sup>·°С/Вт) [1]. На теплотехнические характеристики светопрозрачных ограждающих конструкций (как их приведенное сопротивление теплопередаче, так и температура на их внутренних поверхностях) значи-

тельное влияние оказывают условия теплообмена вблизи внутренних поверхностей подобных конструкций [2].

В настоящее время большинство действующих отечественных и зарубежных нормативных документов в области тепловой защиты зданий предписывают назначать единые граничные условия теплообмена у внутренних поверхностей светопрозрачных ограждающих конструкций [3]. Технически это обусловлено

в том числе трудностями определения локальных коэффициентов теплоотдачи расчетными методами, особенно у внутренних поверхностей светопрозрачных ограждающих конструкций со сложной и нестандартной геометрией [4–14]. Поэтому целесообразно использование упрощенного инженерного способа определения локальных коэффициентов теплоотдачи в натуральных условиях.

### Материалы и методы исследований

Представленный подход к определению локальных коэффициентов теплоотдачи у внутренних поверхностей светопрозрачных ограждающих конструкций основан на использовании данных их тепловизионной съемки. Предпосылки к рассматриваемому в настоящей работе инженерному подходу в первом приближении описаны в [15].

Предложенный подход базируется на оценке результатов тепловизионной съемки профилей распределения температуры в узлах соединения отдельных профильных элементов светопрозрачных ограждающих конструкций, а также их узлов примыкания к наружным стенам. Для его реализации вплотную и перпендикулярно к светопрозрачной ограждающей конструкции устанавливаются бумажные листы с известными значениями коэффициентов излучения. Профиль бумажных листов должен полностью повторять контур профилей исследуемых конструкций. По результатам тепловизионной съемки данных листов бумаги возможно получить фактическое распределение температуры вблизи исследуемой светопрозрачной ограждающей конструкции, а затем графически определить толщины пограничных слоев воздуха, примыкающих к их внутренним поверхностям.

С использованием полученной толщины пограничного слоя воздуха  $b$  возможно определить локальное значение коэффициента теплоотдачи в определенной точке у внутренней поверхности светопрозрачной ограждающей конструкции [16]:

$$\alpha_b = \frac{\lambda_{\text{возд}}(\tau)}{b},$$

где  $\lambda_{\text{возд}}$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°С), при температуре, равной температуре на поверхности конструкции в рассматриваемой точке.

### Результаты и обсуждение

С использованием рассмотренного выше подхода исследован тепловой режим четырех оконных блоков из ПВХ профилей. Каждый из исследуемых оконных блоков был установлен в наружной стене эксплуатируемого помещения. Конструкция наружной стены в каждом случае была различной. Под исследуемой конструкцией во всех случаях располагался работающий отопительный прибор. Фото исследованных оконных блоков представлены на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид оконных блоков в ходе испытаний  
Fig. 1. General view of windows during the test



Рис. 2. Бумажный лист, установленный в нижней части окна  
Fig. 2. The paper sheet installed at the bottom of the window



Рис. 3. Бумажный лист, установленный в верхней части окна  
Fig. 3. The paper sheet installed at the top of the window

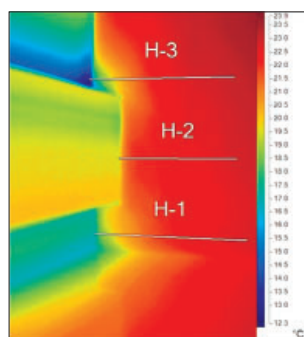


Рис. 4. Термограмма бумажного листа, установленного в нижней части окна  
Fig. 4. Thermogram of the paper sheet installed at the bottom of the window

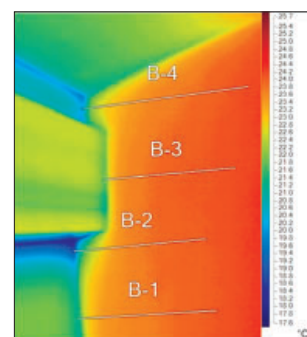


Рис. 5. Термограмма бумажного листа, установленного в верхней части окна  
Fig. 5. Thermogram of the paper sheet installed in the upper part of the window

Перед проведением натуральных испытаний на испытываемые образцы оконных блоков были установлены датчики плотности теплового потока и темпе-

**Значения коэффициентов теплоотдачи  
у внутренних поверхностей оконных блоков,  
полученные различными способами**  
The values of the heat transfer coefficients for the inner  
surfaces of windows obtained by various methods

Положение точки	$\alpha_v$ по показаниям датчиков, Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	$\alpha_v$ по толщине пограничного слоя, Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)
Оконный блок № 1		
Нижний профиль рамы	5,22	5,56
Нижний профиль створки	4,98	3,23
Нижняя краевая зона стеклопакета	6,92	5,52
Оконный блок № 2		
Нижний профиль рамы	4,61	5,97
Нижний профиль створки	5,5	4,79
Нижняя краевая зона стеклопакета	7,49	7,98
Оконный блок № 3		
Нижний профиль рамы	4,73	5,05
Нижний профиль створки	6,45	7,1
Нижняя краевая зона стеклопакета	8,78	10,81
Оконный блок № 4		
Нижний профиль рамы	4,49	4,41
Нижний профиль створки	5,19	3,61
Нижняя краевая зона стеклопакета	7,15	5,05

ратуры. Снаружи оконного блока (на расстоянии не ближе 15 см от остекления) установлены датчики температуры воздуха. Аналогичные датчики были установлены по центру помещения. Перпендикулярно плоскости остекления вплотную к оконному блоку устанавливались вертикальные бумажные листы. Бумажные листы полностью повторяли контур профилей и узлов примыкания оконных блоков.

Примеры установки бумажных листов представлены на рис. 2 и 3.

В процессе измерения велась запись показаний датчиков температуры и плотности теплового потока с периодом времени 30 с, производилась тепловизионная съемка температурных полей бумажных листов (рис. 4, 5).

Для этого при проведении исследований применялись следующие измерительные приборы: универсальный многоканальный измеритель-регистратор Терем-4.1 с совмещенными датчиками температуры поверхности ДТП-А1 и плотности теплового потока ПТП-1Б, датчиками термогигрометрическими ДТГ 2.1 и датчиками температуры поверхности ДТП-А1; тепловизор Fluke Ti55.

Затем на обработанных термограммах строились горизонтальные линии, перпендикулярные плоскости остекления. Примеры графиков изменения температуры по плоскости бумажных листов вдоль построенных линий представлены на рис. 6. По данным графикам определялось расстояние от поверхности

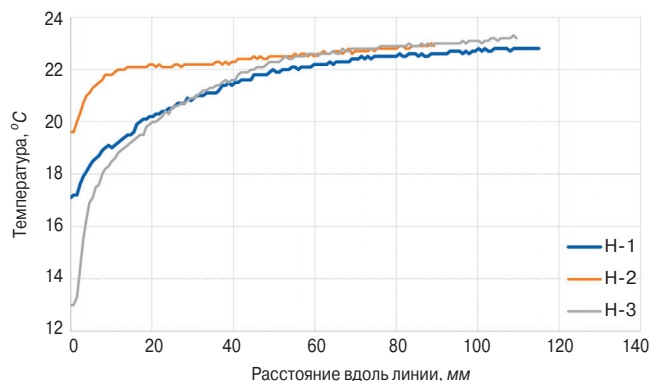


Рис. 6. График изменения температуры вдоль линий H  
Fig. 6. Temperature graph along the H lines

оконной конструкции, в пределах которого наблюдается скачкообразное изменение температуры воздуха. Данное расстояние принималось за толщину пограничного слоя воздуха, которая в дальнейшем использовалась для расчета по формуле значения локального коэффициента теплоотдачи.

По результатам проведенных исследований для каждого оконного блока определены локальные коэффициенты теплоотдачи на характерных участках их внутренних поверхностей. Определение локальных коэффициентов теплоотдачи выполнялось для рассматриваемых участков двумя способами: с использованием предложенного в работе подхода и стандартного подхода, базирующегося на использовании показаний датчиков температуры, устанавливаемых на отступе от внутренней поверхности светопрозрачных конструкций.

Установлено, что наиболее характерным участком всех рассматриваемых оконных блоков являлся их узел примыкания к подоконнику, где наблюдалась наименьшая температура на внутренних поверхностях профильных элементов оконных блоков. Результаты проведенных исследований для рассматриваемого участка оконных блоков представлены в таблице.

Как видно из таблицы, результаты определения локальных коэффициентов теплоотдачи, полученные с применением различных подходов, имеют хорошую сходимость для использования в инженерных расчетах. При этом очевидно преимущество применения данных тепловизионной съемки за счет возможности определения локальных коэффициентов теплоотдачи практически у любой точки внутренней поверхности светопрозрачной ограждающей конструкции.

## Выводы

1. Предложенный в работе подход к определению локальных коэффициентов теплоотдачи у внутренних поверхностей светопрозрачных ограждающих конструкций, основанный на применении данных тепловизионной съемки, позволяет относительно про-

сто получать расчетные значения указанных величин практически для любых типов светопрозрачных ограждающих конструкций, в том числе со сложной геометрией их внутренних поверхностей.

2. Проведенные исследования показывают хорошую сходимость результатов расчетов локальных коэффициентов теплоотдачи, полученных с использованием предложенного подхода и стандартного подхода, базирующегося на использовании показаний датчиков температуры, устанавливаемых на отступе от внутренней поверхности светопрозрачных ограждающих конструкций.

3. Предложенный подход может применяться только для ограждающих конструкций с относительно малым термическим сопротивлением, для которых вклад локальных коэффициентов теплоотдачи в приведенное сопротивление теплопередаче является значительным.

### Список литературы / References

1. Зимин А.Н., Бочков И.В., Крышов С.И., Умнякова Н.П. Сопротивление теплопередаче и температура на внутренних поверхностях светопрозрачных ограждающих конструкций жилых зданий г. Москвы // *Жилищное строительство*. 2019. № 6. С. 24–29. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-6-24-29>
1. Zimin A.N., Bochkov I.V., Kryshov S.I., Umnyakova N.P. Heat transfer resistance and temperature on internal surfaces of translucent enclosing structures of residential buildings of Moscow. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2019. No. 6, pp. 24–29. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-6-24-29>
2. Константинов А.П., Крутов А.А., Тихомиров А.М. Оценка теплозащитных характеристик оконных блоков из ПВХ профилей в зимний период эксплуатации // *Строительные материалы*. 2019. № 8. С. 65–72. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-65-72>
2. Konstantinov A.P., Krutov A.A., Tikhomirov A.M. Assessment of the PVC windows thermal characteristics in winter. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 8, pp. 65–72. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-773-8-65-72>
3. Умнякова Н.П., Бутовский И.Н., Верховский А.А., Чеботарев А.Г. Требования к теплозащите наружных ограждающих конструкций высотных зданий // *Жилищное строительство*. 2016. № 12. С. 7–11.
3. Umnyakova N.P., Butovsky I.N., Verkhovsky A.A., Chebotarev A.G. Requirements to heat protection of external enclosing structures of high-rise buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2016. No. 12, pp. 7–11. (In Russian).
4. Савин В.К. Строительная физика: энергоперенос, энергоэффективность, энергосбережение. М.: Лазурь, 2005. 432 с.
4. Savin V.K. *Stroitel'naya fizika: energoperenos, energoeffektivnost', energosberezhenie* [Construction physics: energy transfer, energy efficiency, energy saving]. Moscow: Lazur'. 2005. 432 p.
5. Bockh P. *Heat Transfer. Basics and Practice*. London – New York: Springer Heidelberg Dordrecht. 2012. 291 с.
6. Mokheimer E.M.A. Heat transfer from extended surfaces subject to variable heat transfer coefficient. *Heat and Mass Transfer*. 2003. Vol. 39, pp. 131–138. <https://doi.org/10.1007/s00231-002-0338-3>
7. Elmahdy A.H., Frank T. Heat transfer at the edge of sealed insulating glass units: Comparison of hot box measurements with finite-difference modeling. *ASHRAE Transactions*. 1993. No. 99, pp. 915–922.
8. Curcija D. Effect of realistic boundary conditions in computer modeling of condensation resistance for fenestration systems. *Thermal Envelopes*. 1998. No. 7, pp. 405–414.
9. McGowan A.G. Computer simulation of window condensation potential. *Thermal Envelopes*. 1998. No. 7, pp. 229–235.
10. Wright J.L. A Simplified numerical method for assessing the condensation resistance of windows. *ASHRAE Transactions*. 1998. No. 1. Pt. 1, pp. 1–8.
11. Yazdaniyan M. Measurement of the exterior convective film coefficient for windows in low-rise buildings. *ASHRAE Transactions*. 1994. № 100.
12. Дроздов В.А. Теплообмен в светопрозрачных ограждающих конструкциях. М.: Стройиздат, 1979. 307 с.
12. Drozdov V.A. *Teploobmen v svetoprozrachnykh ogradhdayushchih konstrukciyah* [Heat exchange in translucent enclosing structures]. Moscow: Stroyizdat, 1979. 307 p.
13. Умняков П.Н. Тепловой и экологический комфорт: проектирование процессов оказания услуг. М.: Форум, 2009. 447 с.
13. Umnyakov P.N. *Teplovoj i jekologicheskij komfort: proektirovanie processov okazaniya uslug* [Thermal and environmental comfort: designing service delivery processes]. Moscow: Forum, 2009. 447 p.
14. Крутов А.А., Константинов А.П. Граничные условия для расчета температурных полей узлов примыкания окон в зоне подоконника // *Жилищное строительство*. 2022. № 11. С. 11–18. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-11-11-18>
14. Krutov A.A., Konstantinov A.P. Boundary conditions for calculating temperature fields of window junction nodes in the window sill area. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2022. No. 11, pp. 11–18. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-11-11-18>
15. Tywoniak J, Stanek K., Kny M, Adamovský D. Studies on internal surface heat transfer in the window area. *E3S Web of Conferences*. 2020. 172, 24007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017224007>
16. Hua Ge. Study on overall thermal performance of metal curtain walls. Hua Ge – Concordia University, Montreal. 2002. 326 p.

УДК 692.82

DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-22-25>

Е.С. ЮРЫШЕВ<sup>1</sup>, ведущий инженер-конструктор (e.yuryshev@alcont-system.ru);  
А.А. ВЕРХОВСКИЙ<sup>2</sup>, канд. техн. наук (v2508@rambler.ru),  
С.С. ПОТАПОВ<sup>2</sup>, научный сотрудник (niisf253@mail.ru)

<sup>1</sup> ООО «Алкон-Трейд-Систем» (111524, г. Москва, ул. Электродная, 2, стр. 12–13–14)

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

## Определение приведенного сопротивления теплопередаче непрозрачных участков конструкций фасадных светопрозрачных

Рассматриваются теплотехнические характеристики конструкций фасадных светопрозрачных (КФС). Проведен анализ результатов теплотехнических испытаний конструкций в климатической камере для различных производителей. В результате сопоставления результатов испытаний с расчетными данными приведенного сопротивления теплопередаче выявлено их существенное расхождение. Разработан метод определения коэффициента линейной неоднородности непрозрачной части КФС на базе лабораторных испытаний с различными заполнениями для разной наружной температуры. На базе определенных в лабораторных условиях коэффициентов линейной неоднородности непрозрачной части КФС предлагается определять достоверные значения их приведенного сопротивления теплопередаче для разных вариантов конструкций.

**Ключевые слова:** конструкции фасадные светопрозрачные, теплотехнические испытания в климатической камере, коэффициент линейной неоднородности непрозрачной части КФС, теплотехнический расчет.

**Для цитирования:** Юрышев Е.С., Верховский А.А., Потапов С.С. Определение приведенного сопротивления теплопередаче непрозрачных участков конструкций фасадных светопрозрачных // *Жилищное строительство*. 2023. № 12. С. 22–25. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-22-25>

E.S. YURYSHEV<sup>1</sup>, Leading Design Engineer (e.yuryshev@alcont-system.ru);

A.A. VERKHOSKIY<sup>2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (v2508@rambler.ru),

S.S. POTAPOV<sup>2</sup>, Researcher, (niisf253@mail.ru)

<sup>1</sup> LLC “Alcon-Trade-System” (2, str. 12-13-14, Elektrodnyaya Street, Moscow, 111524, Russian Federation)

<sup>2</sup> Scientific-Research Institute of Building Physics of RAACS (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

### Determination of the Reduced Heat Transfer Resistance of Opaque Sections of Facade Translucent Structures

The thermal engineering characteristics of the facade translucent structures (FTS) are considered. The analysis of the results of thermal engineering tests of structures in the climate chamber for various manufacturers has been carried out. As a result of comparing the test results with the calculated data of the reduced resistance to heat transfer, their significant discrepancy was revealed. A method has been developed for determining the coefficient of linear inhomogeneity of the opaque part of the FTS based on laboratory tests with different fillings for different outdoor temperatures. Based on the coefficients of linear inhomogeneity of the opaque part of the FTS determined in laboratory conditions, it is proposed to determine reliable values of their reduced resistance to heat transfer for different design options.

**Keywords:** translucent facade structures, thermal engineering tests in a climatic chamber, coefficient of linear heterogeneity of the opaque part of the FTS, thermal engineering calculation.

**For citation:** Yuryshev E.S., Verkhoskiy A.A., Potapov S.S. Determination of the reduced heat transfer resistance of opaque sections of facade translucent structures. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2023. No. 12, pp. 22–25. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-22-25>

В промышленно-гражданском строительстве с каждым годом растет популярность зданий с фасадами, выполненными из конструкций фасадных светопрозрачных (КФС), в том числе с панорамным остеклением, в которых светопрозрачное заполнение занимает значительную, а зачастую и большую часть площади фасадов здания. До недавнего времени эта тенденция относилась в основном к адми-

нистративным и офисным зданиям, но сейчас легко заметить, что тенденция распространилась и на жилое строительство.

Теплопотери через светопрозрачные участки конструкции светопрозрачного фасада значительно больше теплопотерь через стены и другие непрозрачные ограждающие конструкции, поэтому при расчете общей энергоэффективности здания важно верно

определять приведенные сопротивления светопрозрачных конструкций. Однако если для светопрозрачных заполнений и участков стен значения сопротивлений теплопередаче определены достаточно точно и в целом совпадают с результатами экспериментов, то для непрозрачных участков навесных фасадных конструкций теоретические результаты сильно разнятся с полученными практически. Существующие СП 230.1325800.2015 «Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей», СП 50.13330.2012 (изм. 2 от 2022 г.) «Тепловая защита зданий» используют для описания этого физического процесса теплотерьер через теплотехнические неоднородности.

Данной проблеме в настоящее время не уделяется достаточного внимания, фактически определению приведенного сопротивления теплопередаче непрозрачных участков КФС не посвящено научных работ и других публикаций.

Целью данной статьи является разработка методики расчета приведенного сопротивления теплопередаче непрозрачных участков КФС на основании систематизации и обобщения экспериментальных данных и сопоставления их с результатами расчетов, выполненных в соответствии с НТД РФ, СП 50.13330.2012 (изм. 2 от 2022 г.) и ГОСТ Р 54858–2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях».

### Конструкции и испытательное оборудование

Теплотехнические испытания конструкции фасадной светопрозрачной проводились в климатической камере КТК-2009 (стенд для измерения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций КТК-2009) испытательного центра «Фасады СПК» НИИСФ РААСН. В качестве измерительного комплекса использовались комплекты оборудования на базе измерителя плотности тепловых потоков и температуры ИТП-МГ4.03-10 «Поток» и измери-

тельного комплекса на базе мультиметра Keytley. Для проведения испытаний в климатической камере был изготовлен образец – конструкция фасадная светопрозрачная стоечно-ригельная из профилей из алюминиевых сплавов, размером 2450×2300 мм, с шестью светопрозрачными и тремя непрозрачными заполнениями. Схематическое изображение испытываемой конструкции и типовые разрезы приведены на рис. 1.

Ячейки отличаются между собой заполнением непрозрачной части. В варианте 1 заполнение состоит из: однокамерного стеклопакета толщиной 32 мм (6M1–20–6M1); воздушной прослойки 18 мм; минераловатной плиты 150 мм; листа стального оцинкованного толщиной 1 мм. Состав заполнения вариантов 2–4: стекло 8M1; воздушная прослойка; минераловатная плита; лист стальной оцинкованный толщиной 1 мм (толщины воздушных прослоек и минераловатных плит показаны на рис. 2)

Конструкция выдерживалась в климатической камере до наступления стационарного режима теплопередачи.

### Результаты испытаний и обработка результатов измерения

После проведения предварительного тепловизионного обследования конструкций в климатической камере, ширина краевой зоны непрозрачных заполнений выбрана равной 100 мм. Оценка ширины краевой зоны была проведена в соответствии с Приложением А (обязательное) «Выбор термически однородных зон и определение параметров краевых зон светопрозрачного и непрозрачного заполнения» ГОСТ 59633–2021 «Конструкции фасадные светопрозрачные. Метод определения теплотехнических характеристик в климатической камере».

Согласно Приложению Е СП 230.1325800.2015 при оценке теплотехнических характеристик неоднородных конструкций необходимо учитывать линейные

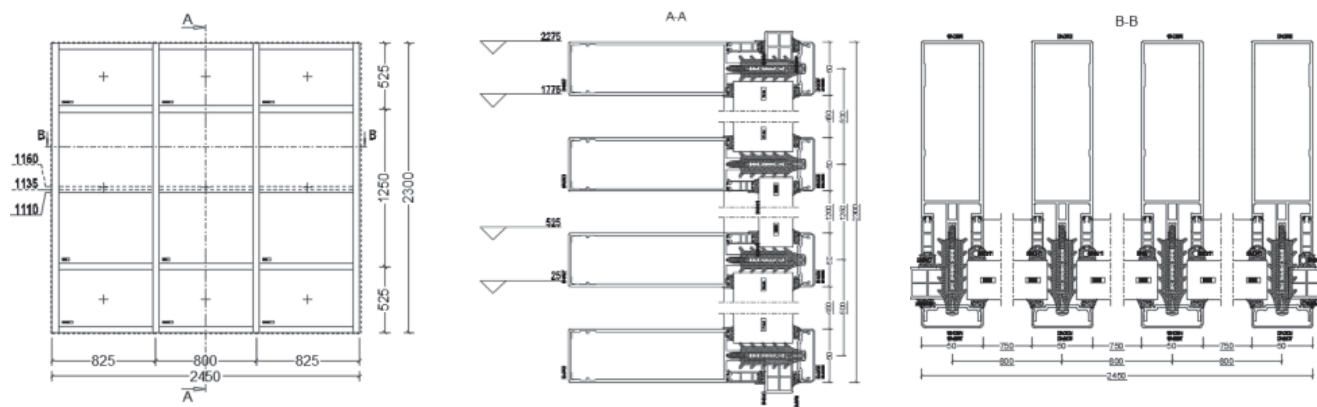


Рис. 1. Конструкция фасадная светопрозрачная  
Fig.1. Façade translucent structure

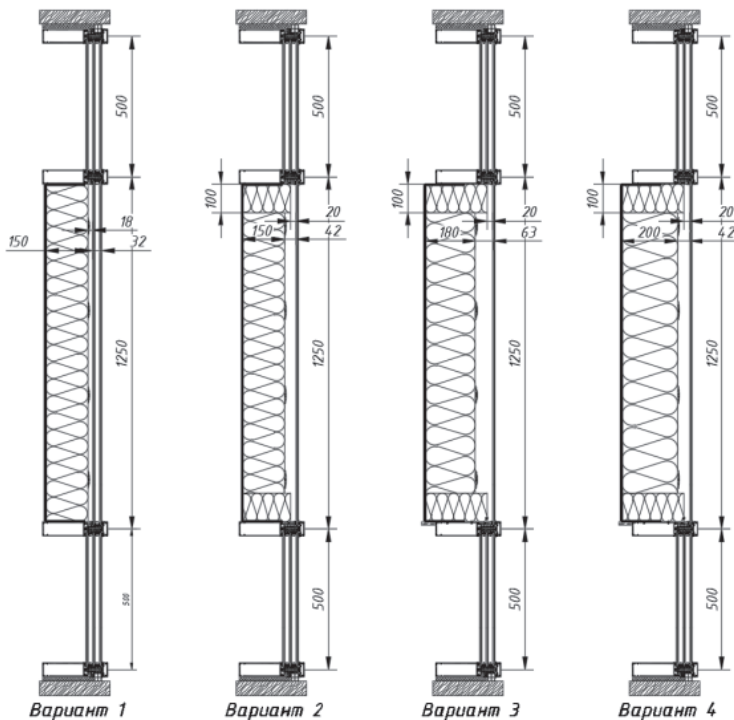


Рис. 2. Конструкция фасадная светопрозрачная. Типы заполнений  
Fig. 2. Façade translucent structure. Types of fillings

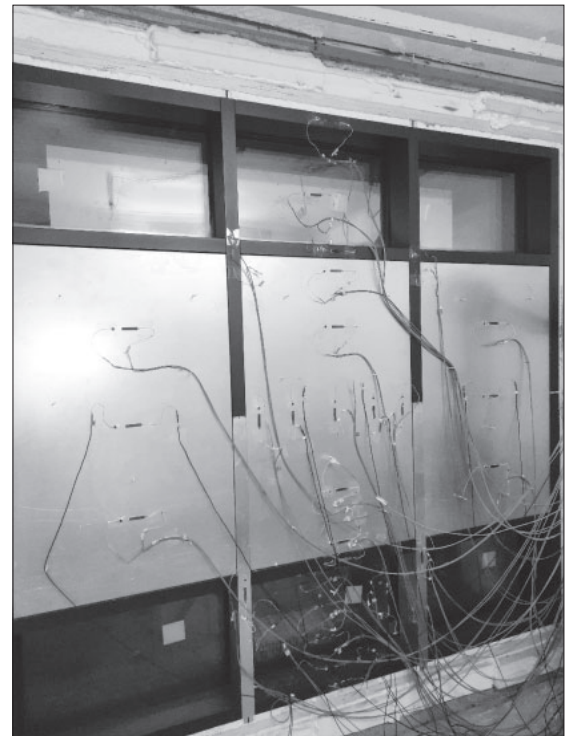


Рис. 3. Внешний вид конструкции фасадной светопрозрачной, установленной в климатической камере. Внутренняя сторона  
Fig. 3. The appearance of the facade translucent structure installed in the climate chamber. View from the inside

и точечные неоднородности. Для проведенных испытаний точечные неоднородности незначительны, поэтому формулу (Е.1) можно переписать без учета составляющей:

$$R_0^{np} = \frac{1}{1/R_0^{вст} + \sum l_j \Psi_j}$$

Для непрозрачной части КФС данная зависимость может быть представлена в виде:

$$R_0^{np} = \frac{S_0}{S_0/R_{расч} + l_{\Psi} \Psi_H}$$

где  $S_0$  – площадь проекции светопрозрачной ограждающей конструкции,  $m^2$ ;  $R_0^{np}$  – приведенное сопротивление теплопередаче непрозрачной зоны конструкции,  $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$ ;  $R_{расч}$  – расчетное сопротивление теплопередаче центральной части непрозрачной зоны конструкции,  $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$ ;  $\Psi_H$  – коэффициент линейной теплопередачи, который учитывает взаимодействие между профильными элементами и непрозрачной зоной конструкции,  $Вт / (m \cdot ^\circ C)$ ;  $l_{\Psi}$  – длина периметра непрозрачной зоны,  $m$ .

Данная зависимость отличается от формулы Е.1 из СП 230.1325800.2015 тем, что в СП 50.13330.2012 не учитываются реальные значения площадей и в качестве расчетного сопротивления теплопередаче центральной части непрозрачной зоны конструкции

принято  $R_0^{вст}$  – усредненное по площади условное сопротивление теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки здания либо выделенной ограждающей конструкции. Предлагаемый подход аналогичен изложенному в ГОСТ ISO 10077-1–2021 «Характеристики теплотехнические оконных блоков, дверных блоков и жалюзи. Расчет коэффициента теплопередачи. Часть 1. Общие положения».

Предлагаемый в [1] подход не может быть распространен на данный класс конструкций, поскольку предполагает наличие значительной вентиляции утеплителя [2–7].

Проведенное сопоставление полученных в результате эксперимента значений коэффициентов линейной теплопередачи, учитывающих взаимодействие между профильными элементами и непрозрачной зоной конструкции, показали хорошую сходимость для аналогичных конструкций различных размеров и геометрических форм.

При этом значения  $\Psi_H$  для различных типов заполнений составили 0,07–0,087  $Вт / (m \cdot ^\circ C)$ .

Проведенные теплотехнические испытания показали, что сопротивление теплопередаче термически однородных зон определяется с достаточной точностью и рассчитывается приведенное сопротивление теплопередаче непрозрачного заполнения путем обратного преобразования; представляется возможным

определить  $\Psi_n$  как коэффициент линейной теплопередачи, который учитывает взаимодействие между профильными элементами и непрозрачной зоной конструкции.

В настоящее время ведется дальнейшая работа в указанном направлении, это позволит в будущем создать расчетную и нормативную базу для определения приведенного сопротивления теплопередаче непрозрачной части фасадных конструкций, что, в свою очередь, приведет к возможности более эффективного использования энергоресурсов.

Полученные значения могут быть использованы для инженерных расчетов приведенного сопротив-

ления теплопередаче непрозрачной части КФС. При этом следует отметить, что для получения полностью корректных значений приведенного сопротивления теплопередаче необходимо получение полного объема экспериментальных данных для комбинаций теплопередачи «непрозрачная часть КФС – непрозрачная часть КФС», «непрозрачная часть КФС – светопрозрачное заполнение».

Данная работа отражает первые этапы исследований теплопотерь через непрозрачную часть КФС, и необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований для каждого из разрабатываемых системных решений.

### Список литературы

1. Елохов А.Е., Верховский А.А., Борисов В.А. Сравнение эффективности схем утепления в системах навесных вентилируемых фасадов // *Строительные науки*. 2018. № 4. С. 116–122.
2. Малявина Е.Г., Урядов М.И., Елохов А.Е. Расчет температурной обстановки, формирующейся в процессе лучисто-конвективного теплообмена в помещении здания с усиленной тепловой защитой // *Строительные материалы*. 2022. № 5. С. 77–82. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-802-5-77-82>
3. Malyavina E.G., Frolova A.A., Landyrev S.S. Microclimate parameters evaluation for spaces with windows of different thermal protection. *Light&Engineering*. 2021. No. 29 (5), pp. 61–67. DOI: 10.33383/2021-078
4. Liang Yu., Zhang Nan, Huang G. Thermal environment and thermal comfort built by decoupled radiant cooling units with low radiant cooling temperature. *Building and Environment*. 2021. Vol. 206. 108342. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108342>
5. Малявина Е.Г., Ландырев С.С. Проверка выполнения требований ГОСТ 30494–2011 к параметрам внутренней среды на границе обслуживаемой зоны // *АВОК*. 2022. № 2. С. 40–42.
6. Малявина Е.Г., Гнездилова Е.А., Левина Ю.Н. Расчетное сопротивление теплопередаче полов по грунту при современных способах их теплозащиты // *Строительные материалы*. 2019. № 6. С. 44–48. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-771-6-44-4>
7. Гагарин В.Г., Малявина Е.Г., Иванов Д.С. Разработка климатической информации в форме специализированного «типового года» // *Вестник ВолгГАСУ*. 2013. Вып. 31 (50), Ч. 1. Города России. С. 343–349.

### References

1. Elokhov A.E., Verkhovsky A.A., Borisov V.A. Comparison of the effectiveness of insulation schemes in systems of hinged ventilated facades. *Stroitelnye nauki*. 2018. No. 4, pp. 116–122. (In Russian).
2. Malyavina E.G., Uryadov M.I., Elokhov A.E. Calculation of thermal conditions generated during the radiant-convective heat exchange process in a room of a building with enhanced thermal protection. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 5, pp. 77–82. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-802-5-77-82>
3. Malyavina E.G., Frolova A.A., Landyrev S.S. Microclimate parameters evaluation for spaces with windows of different thermal protection. *Light&Engineering*. 2021. No. 29(5), pp. 61–67. DOI: 10.33383/2021-078
4. Liang Yu., Zhang Nan, Huang G. Thermal environment and thermal comfort built by decoupled radiant cooling units with low radiant cooling temperature. *Building and Environment*. 2021. Vol. 206. 108342. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108342>
5. Malyavina E.G., Landyrev S.S. Checking for compliance with GOST 30494–2011 requirements for indoor environment parameters at the service zone border. *AVOK*. 2022. No. 2, pp. 40–42. (In Russian).
6. Malyavina E.G., Gnezdilova E.A., Levina Yu.N. Development of calculated resistances to heat transfer of floors via the ground using modern methods of their thermal protection. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 6, pp. 44–48. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-771-6-44-48>
7. Gagarin V.G., Malyavina E.G., Ivanov D.S. Development of Climate Data as a Specific “Reference Year”. *Vestnik of the VolgSUACE*. 2013. No. 31 (50). Vol. 1. Russian Cities, pp. 343–349. (In Russian).

УДК 624.154.8

DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-26-31>

О.А. ШУЛЯТЬЕВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, зам. директора по науке,  
С.О. ШУЛЯТЬЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник,  
П.Г. ШИХРАНОВ<sup>1</sup>, инженер (Shikhranov@niiosp.ru),  
В.В. ОРЕХОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, гл. научный сотрудник;  
Н.К. РОЗЕНТАЛЬ<sup>2</sup>, д-р техн. наук, гл. научный сотрудник

<sup>1</sup> НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство» (109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., 59)

<sup>2</sup> НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» (109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., 6)

## Увеличение несущей способности основания пяты сваи

*Представлены результаты экспериментальных исследований методов повышения несущей способности основания пяты сваи, а также зависимости осадка–нагрузка для двух свай с усиленной пятой по различным технологиям и одной сваи без усиления. В последние годы разработано несколько способов увеличения несущей способности основания пяты сваи, исследования по которым проведены в ограниченном объеме. Тем не менее вопрос об учете несущей способности пяты в настоящее время стоит очень остро, так как может играть ключевую роль при определении несущей способности свай и общего количества свай.*

**Ключевые слова:** *пята сваи, усиление основания сваи, повышение несущей способности, цементация, включение пяты сваи в работу.*

Данная работа выполнена в рамках договора № 32312017211 – 2/2023 на выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы по экспериментальным исследованиям методов повышения несущей способности пяты сваи для ФАУ «ФЦС».

**Для цитирования:** Шулятьев О.А., Шулятьев С.О., Шихранов П.Г., Орехов В.В., Розенталь Н.К. Увеличение несущей способности основания пяты сваи // *Жилищное строительство*. 2023. № 12. С. 26–31. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-26-31>

O.A. SHULIATIEV<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Deputy Director for Science,  
S.O. SHULIATIEV<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering), Leading Researcher, P.G. SHIKHRANOV<sup>1</sup>, Engineer (Shikhranov@niiosp.ru),  
V.V. OREKHOV<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Chief Researcher; N.K. ROZENTAL<sup>2</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Chief Researcher  
<sup>1</sup> Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP) named after N.M. Gersevanov, Research Center of Construction JSC  
(59, 2nd Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)  
<sup>2</sup> Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, Research Center of Construction JSC  
(59, 2nd Institutskaya Street, Moscow, 109428, Russian Federation)

### Increasing the Bearing Capacity of the Base of the Pile Heel

The results of experimental studies of methods for increasing the bearing capacity of the base of the pile heel are presented, as well as the sediment-load dependences for two piles with a reinforced heel using various technologies and one pile without reinforcement are presented. In recent years, several ways have been developed to increase the bearing capacity of the base of the pile heel, research on which has been carried out to a limited extent. Nevertheless, the issue of accounting for the bearing capacity of the heel is currently very acute, as it can play a key role in determining the bearing capacity of piles and the total number of piles.

**Keywords:** pile heel, strengthening the base of the pile, increasing the bearing capacity, cementation, inclusion of the pile heel in the work.

This work was carried out within the framework of contract No. 32312017211 – 2/2023 for the implementation of research and development work on experimental studies of methods for increasing the load-bearing capacity of the pile heel for the Federal Scientific and Technical Center for Certification in Construction (FAU “FCS”).

**For citation:** Shuliatiev O.A., Shuliatiev S.O., Shikhranov P.G., Orekhov V.V., Rozental N.K. Increasing the bearing capacity of the base of the pile heel. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2023. No. 12, pp. 26–31. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-26-31>

Как известно, особенностью буровых свай является тот факт, что в начальный момент нагружения работает в основном боковая поверхность сваи, а включение в работу пяты происходит при больших значениях нагрузки и осадки.

В соответствии с исследованиями L.C. Reese, M.W. O'Neil [1], а также G.G Meyerhof [2], О.А. Шуля-

тьева, Р.Ф. Шарафутдинова, С.О. Шулятьева [3–5], это связано с тем, что в забое скважины в процессе устройства таких свай формируется прослойка расструктуренного грунта толщиной до 15–20 см. Эта прослойка так называемого шламового слоя как раз и снижает сопротивление грунта под пятой сваи в целом.

Вопросам усиления пяты для повышения несущей способности посвящено большое количество исследований, однако следует выделить два наиболее характерных вида: усиление с формированием уширения и уплотнение околосвайного грунтового пространства.

К увеличению несущей способности с формированием уширения следует отнести следующие способы: камуфлетный, электроразрядный, с помощью расширяющихся объемных оболочек, цементации под давлением. Данными вопросами занимались А.А. Луга, В.Я. Еремин, А.А. Буданов, З.Г. Тер-Мартirosян, К.В. Голубев, А.Б. Пономарев, Н.В. Купчикова, А.В. Сапожников.

Из этой группы особенно выделяется метод цементации, производимой под давлением. Эффективность данного метода продемонстрирована в одной из последних работ в области применения технологий улучшения условий работы грунта под пятой сваи, выполненной S. Dapp, G. Mullins, E. Frederick, V. Wagner [6], и в обобщении ее результатов [7]. Целью работы являлась оценка эффективности различных технологий цементации пяты сваи. Работы по исследованию производились в течение четырех лет. Программой испытания было предусмотрено устройство и последующее испытание 26 свай в различных грунтовых условиях. По оценке авторов, в результате применения технологий цементации эффективность свай увеличилась на 41–743% в зависимости от грунтовых условий (таблица). Наибольшая эффективность отмечена в сжимаемых, хорошо дренирующих грунтах с малой относительной плотностью.

К уплотнению околосвайного грунтового пространства относятся методы раскатывания, пневматического прессования ствола сваи, метод устройства свай в пробитых скважинах, метод втрамбовывания жесткого материала или железобетонного элемента в грунт забоя скважины. Здесь можно выде-

лить исследования В.Л. Рафальзука, А.А. Григорян, Ю.А. Чиненкова, Ю.Е. Пономаренко, И.В. Ходорова, Р.Р. Авазова.

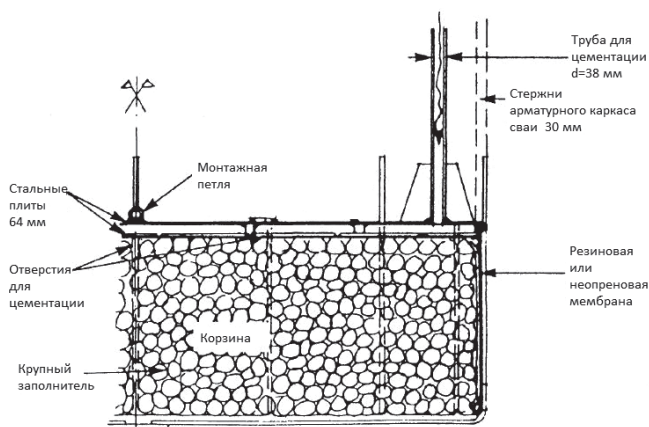
Результаты испытаний, приведенные в работе Ю.А. Чиненкова [8] в 1982 г., показали, что для свай, устраиваемых с уплотнением грунта втрамбовыванием щебня, характерно отсутствие срыва после истощения сопротивления по боковой поверхности; осадка сваи с повышением нагрузки растет с наступлением стабилизации деформаций на каждой ступени нагружения. Пята сваи на данном этапе работает как заглубленный штамп на уплотненном основании. Сравнение результатов испытаний сваи с втрамбованным в забой скважины щебнем и идентичной сваи без уплотнения забоя скважины позволило установить, что сопротивление под нижним концом сваи за счет уплотнения увеличилось в пять раз.

Наиболее технологичным методом, в котором используется уплотнение с помощью крупного заполнителя, является метод с погружением щебеночной кассеты, использованный на строительстве моста в Маракайбо (Венесуэла) в 1961 г. [9]. Это устройство, изображенное на рис. 1, называлось «ячейкой преднапряжения» и представляло собой корзину с гравием, погружаемую в забой скважины. Внутренний объем этой корзины цементировался с помощью четырех труб, соединяющих ее с поверхностью.

Несмотря на обширный объем натурных исследований, все они проводились без сравнительного анализа эффективности различных методов между собой. Для оценки эффективности технологий усиления были проведены опытные работы с испытанием трех трехметровых буронабивных свай Ø880 мм из бетона В40 с использованием щебеночной кассеты с последующей ее цементацией, а также метода высоконапорной цементации jet-grouting. Одна свая была изготовлена без усиления пяты сваи для проведения сопоставительного контроля.

**Эффективность применения технологий преднапряжения пяты сваи в зависимости от грунтовых условий**  
**Efficiency of using pile heel pre-stressing technologies depending on soil conditions**

Расположение строительной площадки	Эффективность (%)	Тип грунта/консистенция
Clearwater Site II	743	Пылеватый глинистый песок
Clearwater Site I	349	Песок от пылеватого до средней плотности
PGA Blvd.	263	Песок от пылеватого до средней плотности
Natchez Trace Parkway	109	Жесткий илистый грунт
Royal Park Bridge	83	Сцементированный песок
NGES/Auburn	77	Ил средней плотности
TexDOT Demo	71	Глина твердая
TexDOT Demo	41	Песок крупный



**Рис. 1. Ячейка преднапряжения**  
**Fig. 1. Prestress cell**

### Описание площадки проведения испытаний

Для испытаний была выбрана площадка в районе деревни Путилково городского округа Красногорск Московской области. Инженерно-геологические условия участка в пределах заглубления испытываемых конструкций представлены в основном техногенными грунтами и глинами легкими, полутвердыми с  $I_L=0,25$ ;  $\varphi=16^\circ$ ;  $c=52$  кПа. Схема устройства скважины и конструкция опытной сваи представлены на рис. 2.

Бурение для устройства опытных свай выполнялось под защитой обсадной трубы с помощью ковшебура. Для имитации сжимаемой шламовой прослойки на дно свежины укладывалась глинистая паста текучепластичной консистенции мощностью 30 см. Извлечение обсадной трубы производилось после завершения бетонирования сваи. Усиление пяты сваи производилось после набора бетоном сваи 40% прочности.

Одна из свай оборудовалась кассетой со щебнем фракции 70–150 мм (рис. 3), выполненной из арматурных стержней с предустановленными в нее трубами для проведения ее последующей цементации. Цементный раствор подавался через штуцеры попеременно через две инъекционные трубы до самоизлива чистого раствора из другой трубы. Для создания уплотненного массива под пятой сваи далее одна из труб глушилась и раствор подавался под давлением 3 МПа.

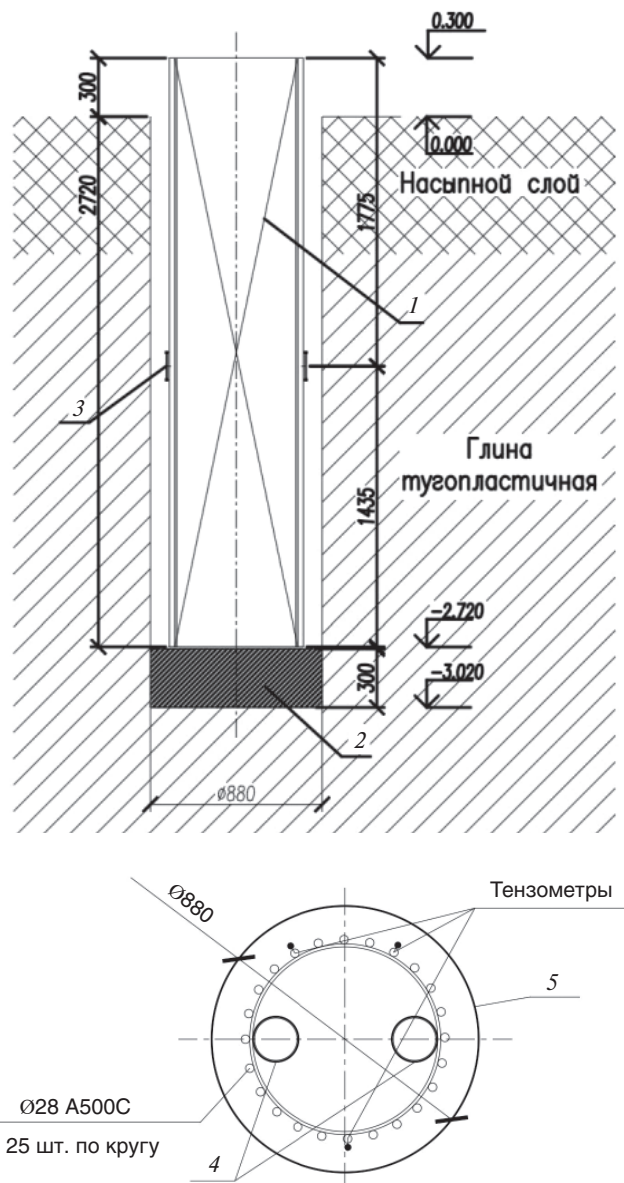
В каркас другой сваи были заложены трубы  $\varnothing 168$  мм для проведения jet-grouting. Струйная цементация под пятой сваи выполнялась по технологии jet-1 под давлением 45 МПа. В результате было получено усиление в виде грунтоцементного элемента высотой 1 м, расход цемента при этом составил 1000 кг/п. м. усиления, или 600 кг/м<sup>3</sup>.

### Методика проведения испытаний

Чтобы определить эффективность предложенных методов усиления, опытные сваи испытывались статической нагрузкой в соответствии с ГОСТ 5686–2020 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями». Нагружение выполнялось ступенями по 50 кН, максимальная нагрузка, передаваемая на оголовок сваи, составила 500 кН. Переход на следующую ступень нагружения осуществлялся при достижении критерия условной стабилизации, равного 0,1 мм за час наблюдений. При проведении испытаний производились измерения осадок опытных свай, кроме этого, измерялись усилия на глубине 1,74 м, воспринимаемые боковой поверхностью сваи.

### Приборы и оборудование

Нагружение осуществлялось с использованием гидравлического домкрата и грузовой платформы



**Рис. 2.** Схема устройства скважины: 1 – каркас опытной сваи; 2 – усиление основания под пятой; 3 – тензометрические датчики; 4 – трубы для проведения усиления; 5 – тело сваи  
**Fig. 2.** The scheme of the well arrangement: 1 – the frame of the experimental pile; 2 – enhancing performance of the base under the heel; 3 – strain gauges; 4 – pipes for providing enhancing performance the base under the heel of pile; 5 – the pile body

с упорной балкой в соответствии с ГОСТ 5686–2020 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями». Каждая свая оснащалась реперной системой, состоящей из двух реперных балок, шарнирно опертых с одного из концов, и двух прогибомеров типа ПСК-МГ4, закрепленных на боковой поверхности сваи друг напротив друга (рис. 4). Также опытные сваи были оснащены тензометрическими датчиками для определения напряжений в бетонном сечении. Показания тензометров обрабатывались с использованием методов математической статистики с последующим определением усилия в сечении сваи. Схемы установки тензометров показаны на рис. 2.



Рис. 3. Кассета со щебнем  
Fig. 3. Cassette with crushed stone



Рис. 4. Испытательный стенд. Общий вид  
Fig. 4. General view of the test stand

### Результаты испытаний и их анализ

По результатам опытных работ были получены зависимости «осадка–нагрузка» и «усилие–нагрузка», представленные на рис. 5 и 6. На основании них также были получены зависимости сопротивления сваи по боковой поверхности от осадки (рис. 7) и усилие, приходящееся на пяту сваи. На основании его был определен коэффициент включения пяту сваи в работу (рис. 8).

При анализе зависимости осадки от нагрузки (рис. 5), построенной для сваи без усиления, выделяется несколько характерных особенностей данной кривой, а именно: рост перемещений после достиже-

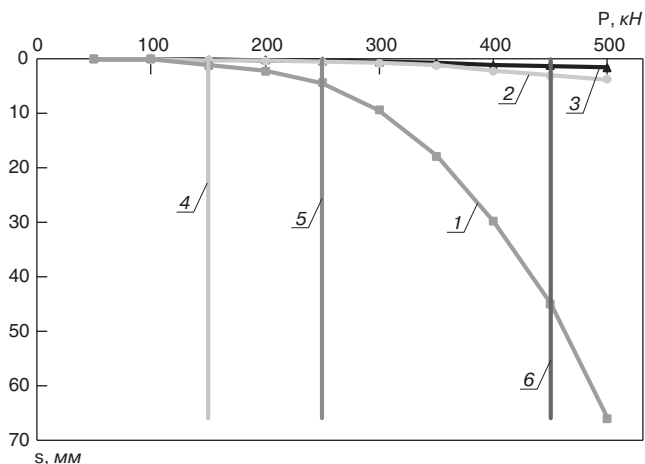


Рис. 5. Совмещенный график зависимости осадки от нагрузки для опытных свай: 1 – свая без усиления; 2 – свая со щебеночной кассетой; 3 – свая с jet-I; 4 – несущая способность боковой поверхности сваи в соответствии с СП 24.13330.2021; 5 – несущая способность боковой поверхности сваи в соответствии с СП 24.13330.2021 без учета коэффициента условий работы по способу устройства сваи; 6 – несущая способность сваи в соответствии с СП 24.13330.2021 с учетом сопротивления по пяту сваи

Fig. 5. Combined graph of settlement versus load for experimental piles: 1 – pile without reinforcement; 2 – pile with crushed stone cassette; 3 – pile with jet-I; 4 – bearing capacity of the side surface of the pile in accordance with SP 24.13330.2021; 5 – bearing capacity of the side surface of the pile in accordance with SP 24.13330.2021 without taking into account the coefficient of working conditions according to the method of pile arrangement; 6 – bearing capacity of the pile in accordance with SP 24.13330.2021, taking into account the resistance along the heel of the pile

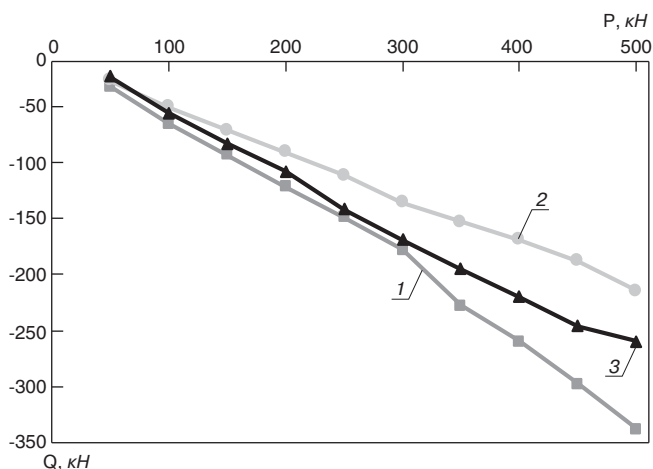
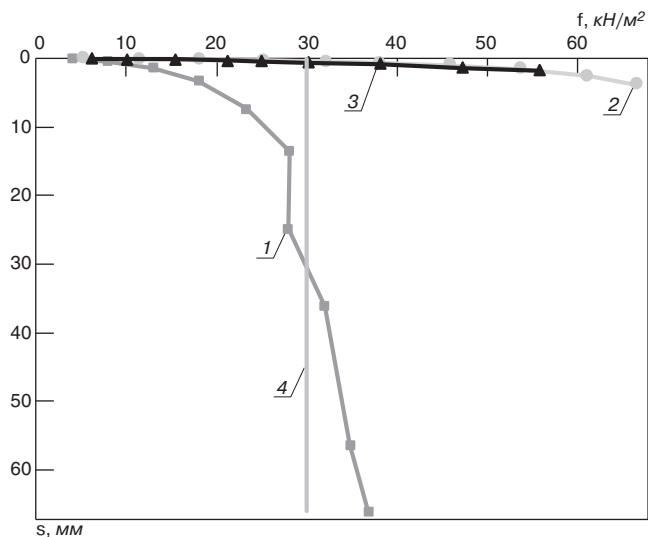


Рис. 6. Зависимость усилия в сечении опытных свай с тензотрами от нагрузки: 1 – свая без усиления; 2 – свая с кассетой; 3 – свая с jet-I

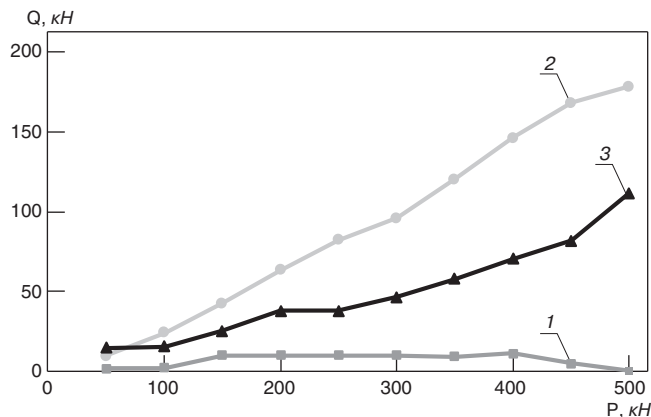
Fig. 6. The dependence of the force in the cross section of experimental piles with strain gauges on the load: 1 – pile without reinforcement; 2 – pile with crushed stone cassette; 3 – pile with jet-I

ния нагрузки в 300 кН, связанный со срывом сваи по боковой поверхности; достижение несущей способности сваи при нагрузке 400 кН. Срыв по боковой поверхности сваи без усиления отчетливо заметен на графике зависимости усилия от нагрузки (рис. 6): при достижении значения 300 кН на кривой наблюдается



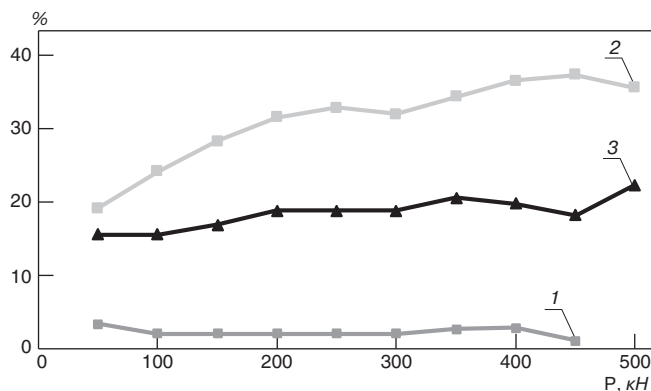
**Рис. 7.** Совмещенный график зависимости сопротивления по боковой поверхности от осадки для испытываемых свай: 1 – свая без усиления; 2 – свая со щебеночной кассетой; 3 – свая с jet-1; 4 – предельное сопротивление по боковой поверхности в соответствии с СП 24.13330.2021

**Fig. 7.** Combined graph of the dependence of resistance along the lateral surface on settlement for the tested piles: 1 – pile without reinforcement; 2 – pile with a crushed stone cassette; 3 – pile with jet-1; 4 – maximum resistance along the side surface in accordance with SP 24.13330.2021



**Рис. 8.** Усилие, приходящееся на пятю опытных свай: 1 – свая без усиления; 2 – свая с кассетой; 3 – свая с jet-1

**Fig. 8.** The force on the heel of the experimental piles: 1 – pile without reinforcement; 2 – pile with crushed stone cassette; 3 – pile with jet-1



**Рис. 9.** Коэффициент включения пяты в работу: 1 – свая без усиления; 2 – свая с кассетой; 3 – свая с jet-1

**Fig. 9.** Coefficient of mobilize base resistance of pile: 1 – pile without reinforcement; 2 – pile with crushed stone cassette; 3 – pile with jet-1

характерный перегиб, что свидетельствует об изменении скорости возрастания усилия в наблюдаемом сечении. Для свай с усилением основания пяты зависимости «усилие–нагрузка» и «осадка–нагрузка» носят линейный характер на протяжении всех ступеней приложения нагрузки.

Эти же явления иллюстрирует зависимость сопротивления сваи по боковой поверхности от осадки (рис. 7): отмечается характерный момент срыва, а затем изменение скорости роста сопротивления по боковой поверхности сваи, характеризующее наличие остаточного трения грунта.

Как следует из графиков, изображенных на рис. 8 и 9, пятя сваи без усиления нагрузки воспринимается только боковой поверхностью. У свай с усилением срыва по боковой поверхности не происходит: пятя сразу включается в работу и не дает достичь необходимого для срыва по боковой поверхности перемещения. Таким образом, длина линейного участка развития перемещений и усилий в сечении сваи для свай с усилением основания пяты значительно больше, чем для контрольной сваи без усиления. Это свидетельствует о том, что для достижения перемещения, характеризующего несущую способность свай с усилением пяты, необходимо приложить нагрузку, в несколько раз превосходящую ту, которая была приложена для сваи без усиления.

Для наглядности на полученные зависимости были нанесены значения несущей способности испытываемой сваи, рассчитанные в соответствии с СП 24.13330.2021 «Свайные фундаменты». Расчетная несущая способность боковой поверхности сваи получается почти в 2,5 раза меньше фактической, в 1,6 раза меньше без учета коэффициента условий работы сваи, связанного с устройством буровой сваи. И только полная расчетная несущая способность с учетом сопротивления основания под пятой сваи приближается к значению фактически установленной несущей способности боковой поверхности испытываемой сваи. Таким образом, несущая способность, рассчитанная в соответствии с формулами СП 24.13330.2021, является существенно заниженной.

Анализ графиков, изображенных на рис. 9, показывает, что на пятю сваи приходится до 35% от передаваемой нагрузки. С ростом прикладываемой нагрузки степень включения пяты сваи в работу возрастает. Таким образом, использование методов усиления пяты позволяет увеличить несущую способность сваи до 30%. Реальная эффективность методов усиления зависит от вида и физико-механических характеристик грунта, расположенного в основании пяты сваи, размера и длины сваи и должна определяться экспериментально путем проведения испытания несущей способности основания пяты сваи.

### Выводы

Анализ литературы по методам повышения несущей способности основания пяты сваи позволил выделить два метода: уплотнение околосвайного грунтового пространства с использованием крупного заполнителя и формирование уширения при помощи цементации. Эффективность данных методов характеризуется повышением несущей способности до 20–40% и более.

Для возможности проведения сравнительной оценки проведены испытания до нагрузки 500 кН трех трехметровых буронабивных свай Ø880 мм из бетона В40 с использованием щебеночной кассеты с последующей ее цементацией, а также метода высоконапорной цементации jet-grouting. Одна свая была изготовлена без усиления пяты сваи для проведения сопоставительного контроля.

По результатам испытаний было получено, что сваи с усилением основания пяты обладают повышенной несущей способностью и меньшей деформативностью по сравнению со сваями без усиления.

На пяту сваи с усилением приходится до 35% от прикладываемой нагрузки, с ростом прикладываемой нагрузки степень включения пяты сваи в работу возрастает. Таким образом, использование методов усиления пяты позволяет увеличить несущую способность сваи до 30%.

Реальная эффективность методов усиления зависит от вида и физико-механических характеристик грунта, расположенного в основании пяты сваи, размера и длины сваи и должна определяться экспериментально путем проведения испытания несущей способности основания пяты сваи. Для того чтобы более точно оценить эффект проведения усиления основания под пятой на несущую способность сваи, необходимо проводить дальнейшие исследования в данной области.

### Список литературы / References

1. Reese L.C., O'Neil M.W. Field Load Tests of Drilled Shafts. *Proceedings of International Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles*. Balkema. Rotterdam. 1988.
2. Meyerhof G.G. The Ultimate Bearing Capacity of Foundations. *Geotechnique*. 1951. Vol. 2. No. 4, pp. 301–332.
3. Шулятьев О.А. Основания и фундаменты высотных зданий. М.: АСВ, 2020. 442 с.
3. Shulyatyev O.A. Osnovaniya i fundamenti vysoznykh zdanii [Foundations and foundations of high-rise buildings]. Moscow: ASV. 2020. 442 p.
4. Shulyat'ev O.A., Sharafutdinov R.F. & Shulyat'ev S.O. Generalization of the test results of bored piles in rocky soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2022. No. 59, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11204-022-09777-9>
5. Sharafutdinov R.F., Shulyat'ev O.A., Isaev O.N., Zakatov D.S. et al. Studies of interaction of drilled piles with rocky soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2022. No. 59, pp. 430–436. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11204-022-09833-4>
6. Mullins G., Dapp S., Frederick E., Wagner V. Post grouting drilled shaft tips. Tampa, Florida: University of South Florida, 2004.
7. Dapp S.D. Muchard M., Brown D.A. Experiences with base grouted drilled shafts in the southeastern United States. In: *Proceeding of 10<sup>th</sup> International Conference on Piling and Deep Foundations*. 2006.
8. Чиненков Ю.А. Исследование работы набивных свай в скважинах с уплотнением грунта на забое: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1982. С. 100–125.
8. Chinenkov Yu. A. Investigation of the work of packed piles in wells with soil compaction at the bottom. Cand. Diss. (Engineering). Moscow. 1982, pp. 100–125. (In Russian).
9. Bruce D.A. Enhancing the performane of large diameter piles by grouting. *Ground Engineering*. Brentwood, Essex. 1986.

**Как живет и трудится редакция издательства «Стройматериалы»,  
как делаются наши журналы,  
что нового и интересного в отрасли — расскажем и покажем!**

**Объединение профессионалов гарантирует успех!**

**Оставайтесь с нами!**

**Присоединяйтесь к нашему Телеграм-каналу:**

**[https://t.me/journal\\_cm](https://t.me/journal_cm)**



УДК 728.03

DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-32-45>

В.А. ШАШКИН, канд. техн. наук (vashashkin@pi-georeconstruction.ru.com)

Институт «Геореконструкция» (190005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., 4)

## Накопленные деформации исторической застройки Санкт-Петербурга

Представлен анализ деформаций рядовой исторической застройки Санкт-Петербурга, накопленных за последние 150–200 лет. Предложен эффективный способ оценки накопленной неравномерности осадков и кренов исторических строений, позволяющий получить достоверное представление о форме деформирования здания. На примере представительной выборки строений из двух центральных частей города показано, какие формы деформаций преобладают в историческом центре. В половине случаев происходят деформации в наиболее опасной для строений форме выгиба в продольном направлении и крена фасадных стен наружу в поперечном сечении. Приведены зависимости относительной неравномерности осадков исторических зданий от соотношений их длины и ширины к высоте. Отмечены причины формирования характерного вида деформаций в виде выгиба. Результаты проведенной оценки накопленной относительной неравномерности осадков, которые получили здания в процессе своего существования, позволили установить, что накопленные деформации более чем на порядок превышают предельно допустимые значения для аналогичных по конструктивному решению объектов нового строительства. Сохраняется эксплуатационная пригодность зданий, это свидетельствует об их долговечности при условии постоянного ухода и регулярных ремонтов. Предложено при оценке категории технического состояния исторических зданий и памятников учитывать накопленную неравномерность осадков. На основании проведенных исследований даны предложения по уточнению требований действующих норм в части назначения предельных дополнительных деформаций кирпичных исторических зданий и объектов культурного наследия.

**Ключевые слова:** историческая застройка, объекты культурного наследия, накопленная неравномерность осадков, формы деформаций зданий, дополнительные деформации сооружений, предельные деформации.

**Для цитирования:** Шашкин В.А. Накопленные деформации исторической застройки Санкт-Петербурга // *Жилищное строительство*. 2023. № 12. С. 32–45. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-32-45>

V.A. SHASHKIN, Candidate of Sciences (Engineering) (vashashkin@pi-georeconstruction.ru)  
Institute «Georeconstruction» (4, Izmaylovskiy pr., St. Petersburg, 190005, Russian Federation)

### Accumulated Deformations of the Historical Development of St. Petersburg

An analysis of the deformations of the ordinary historical buildings of St. Petersburg, accumulated over the past 150–200 years, is presented. An effective way to assess the accumulated unevenness of sediments and rolls of historical buildings is proposed, which makes it possible to obtain a reliable idea of the shape of the deformation of the building. On the example of a representative sample of buildings from two central parts of the city, it is shown which forms of deformations prevail in the historical center. It was revealed that in half of the cases deformations occur in the form of bending in the longitudinal direction and roll of the facade walls outward in the cross section, which is most dangerous for buildings. The dependences of the relative unevenness of the settlement of historical buildings on the ratios of their length and width to height are given. The reasons for the formation of a characteristic type of deformations in the form of a bend are noted. The results of the assessment of the accumulated relative unevenness of sediments that buildings received in the course of their existence made it possible to establish that the accumulated deformations are more than an order of magnitude higher than the maximum permissible values for similar structures of new construction. At the same time, the operational suitability of buildings is maintained, which indicates their durability under the condition of constant maintenance and regular repairs. It is proposed to take into account the accumulated unevenness of settlement when assessing the category of technical condition of historical buildings and monuments. On the basis of on the conducted research, proposals are made to clarify the requirements of the current norms regarding the appointment of maximum additional deformations of brick historical buildings and cultural heritage sites.

**Keywords:** historical buildings, cultural heritage objects, accumulated unevenness of settlements, forms of deformations of buildings, additional deformations of structures, extreme deformations.

**For citation:** Shashkin V.A. Accumulated deformations of the historical development of St. Petersburg. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2023. No. 12, pp. 32–45. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-32-45>

В компьютеризированном XXI веке специалисты-геотехники располагают самым современным программным обеспечением, реализующим множество моделей деформационного поведения грунтов, ко-

торое позволяет прогнозировать развитие неравномерных осадков. Можно критиковать эти модели в отношении точности расчетных прогнозов, но следует признать, что к левой части главного геотехническо-

го критерия в научном геотехническом сообществе всегда существовало достаточное внимание:

$$S \leq S_u, \quad (1)$$

где  $S$  – расчетная деформация сооружения. Этого нельзя сказать о правой части неравенства – предельной деформации  $S_u$ . В своей статье, опубликованной еще в 1975 г., известный английский геотехник Дж. Бёрланд отмечал: «По сравнению с количеством технической литературы о прогнозировании осадок вопросу о допустимых осадках и влиянии осадок на работу и эксплуатационную пригодность конструкций уделялось довольно мало внимания» [1]. Это замечание остается актуальным и по прошествии полувека. Казалось бы, в современную компьютерную эпоху в определении допустимых деформаций сооружения не должно возникать существенных сложностей: они должны выявляться из расчетов взаимодействия основания и сооружения. Допустимы такие осадки, при развитии которых в конструкциях и узлах их сопряжения не возникают опасные усилия и деформации.

С начала 2000-х гг. у проектировщиков появился такой мощный инструмент, как программа FEM models и, несколько позже, IEE Clouds, разработанные специалистами института «Геореконструкция», позволяющие выполнять совместные расчеты сооружения и основания в единой расчетной модели [2–4]. Однако проектирование в настоящее время в абсолютном большинстве случаев ведется отдельно: основания и фундаменты рассчитываются в одних программных продуктах, а наземные конструкции – в других; в лучшем случае между ними устраивается итерационное уточнение напряженно-деформированного состояния. Нельзя не заметить, что при таких отдельных расчетах появляется дополнительная возможность возникновения существенных ошибок.

Таким образом, вопрос о назначении  $S_u$  не потерял своей актуальности даже для объектов нового строительства, последовательность строительства которых известна заранее и осадки которых поддаются прогнозу настолько, насколько совершенны расчетные методы механики грунтов и строительной механики. Наконец, за развитием деформаций таких объектов можно проследить инструментально с помощью мониторинга. Но по-прежнему актуальным остается вопрос о назначении предельной дополнительной деформации  $S_{ad,u}$  для существующих зданий, на которые оказывается внешнее воздействие со стороны соседней строительной площадки либо которые сами подлежат реконструкции. Для исторических зданий абсолютные осадки, накопленные ими за время строительства и эксплуатации, неизвестны, поскольку расчетный прогноз не выполнялся, а мониторинг не проводился. Именно поэтому сначала

в петербургских, затем в московских и, наконец, в общероссийских строительных нормах критерий (1) был сформулирован в терминах дополнительных деформаций:

$$S_{ad} \leq S_{ad,u} \quad (2)$$

Такой прием позволяет обнулить неизвестную автору историю накопления деформаций зданием и оперировать только в приращениях деформаций, ограничивая их известными значениями норм. Учету ранее накопленных деформаций способствует назначение категории технического состояния здания: чем оно хуже, тем меньшие дополнительные деформации для него допустимы. Последние, впрочем, определены достаточно произвольно, как принято говорить в таких случаях, «эмпирически», хотя точнее было бы сказать «на основе экспертного мнения», причем для весьма ограниченного круга конструктивных схем исторической застройки. В результате нередко значения дополнительных деформаций для зданий одной и той же категории технического состояния оказываются избыточно строгими в одних случаях и слишком смелыми в других. Некоторые здания претерпевают дополнительные осадки без заметных деформаций, а другие при тех же значениях приходят в аварийное состояние.

Совершенно очевидно, что причиной этого недостатка является неучет накопленных зданием деформаций и обусловленных ими повреждений. Хотя абсолютные значения накопленных осадок исторических, т. е. дореволюционных, зданий доподлинно неизвестны, поскольку не проводилось геодезических измерений с момента их строительства, тем не менее приоткрыть завесу тайны над историей их деформирования все же возможно.

В статье предпринята попытка восполнить пробел информации о накопленных деформациях зданий исторической застройки Санкт-Петербурга на основе обобщения большого объема данных обследований, выполненных институтом «Геореконструкция». Предметом исследования в данном случае является *рядовая* историческая застройка Санкт-Петербурга, в которой немало памятников архитектуры [5]. Основное внимание уделено «фоновой» застройке, которая определяет «строгий стройный вид» Северной столицы и составляет абсолютное большинство исторических строений в центре города, самом крупном в мире памятнике в списке всемирного наследия ЮНЕСКО.

#### **Краткая характеристика исторической застройки**

Прежде всего следует охарактеризовать объект исследования – рядовую историческую застройку Санкт-Петербурга. Часто можно услышать мнение даже профессиональных искусствоведов, что каждое

здание уникально. В отношении истории и художественного убранства с этим не приходится спорить: они неповторимы ровно так же, как и личность каждого человека. Но в отношении анатомии, к счастью, люди похожи друг на друга, что, собственно, и определяет успехи медицины. Равным образом все исторические здания походят друг на друга своими материалами: камень, кирпич, дерево, а с середины XIX в. металл, да связующее в виде известки – вот весь перечень доступных дореволюционных строительных материалов (применение бетона на портландцементе началось только в начале XX в. и в рядовой застройке до 1917 г. почти не встречалось). Не слишком различались между собой и конструктивные схемы, и даже объемно-пространственные компоновочные решения рядовой застройки. Причиной этого была строгая регламентация градостроительной деятельности в Санкт-Петербурге, которая способствовала формированию характерной структуры застройки. Подробному описанию этой регламентации посвящена специальная статья [6], обобщающая технические аспекты регламентации городской застройки на основании исследований ряда авторов, среди которых следует назвать прежде всего известного исследователя развития петербургской агломерации С.В. Семенцова [6, 7]. Остановимся только на кратком упоминании основных параметров регламентации городского строительства, которая поначалу распространялась на Санкт-Петербург и чуть позже на Москву, а с екатерининского времени – решительно на все российские города.

Итак, регламентация застройки начиналась с составления генеральных планов, на основании которых в екатерининские времена была реорганизована застройка 350 городов Российской империи. Регламентам подчинялась разбивка города на кварталы, а кварталов – на отдельные участки (домовладения), размеры которых также контролировались. Для центральных кварталов Санкт-Петербурга предписывалась непрерывная застройка по красным линиям улиц. При этом внутренние строения и службы надлежало возводить по периметру участка – так формировалась брандмауэрная застройка. Обращать окна на соседние участки не допускалось по противопожарным соображениям.

Типизация застройки участка привела к формированию на нем характерной структуры домовладения с лицевым строением по красной линии улицы, вплотную примыкающим к соседним зданиям, и внутренними строениями вдоль границ участка, образующими один или несколько дворов, соединенных проездами.

Развитие домовладения начиналась с лицевого строения, которое поначалу могло быть двух-

трехэтажным и иметь разрывы с соседними зданиями (кроме Адмиралтейской стороны, где изначально преобладал сплошной тип застройки). Со временем (с 1760 г.) брандмауэрный тип стал обязательным, а пунктирный сохранился лишь в пригородах. Промежутки между домами застраивались, во дворах возводились сначала службы, а позднее внутренние корпуса, предназначенные для проживания. Со временем могла производиться надстройка лицевых и дворовых строений до четырех-пяти этажей. Заметим, что при реконструкции зданий существующие строения обычно стремились сохранить и включить в состав нового сооружения.

Ширина участка по фасаду здания была различной в разных частях города. Например, старейшие каменные кварталы города в Адмиралтейской части в районе Миллионной ул. имели размер вдоль улицы 10–20 сажен (21,3–42,6 м), а в районе Галерной ул. – преимущественно 10 сажен (21,3 м). Со временем лицевые корпуса надстраивались, а дворовые пере-страивались для сдачи в наем. Рост в высоту ограничивался уровнем карниза Зимнего дворца (11 сажен или 23,43 м). Это правило действовало до самой революции и по сей день остается важным ограничением для строительства и реконструкции в центре города.

Лицевое строение, как правило, возводилось с тремя продольными капитальными стенами, с окнами на улицу и во двор, а дворовые, расположенные по границам участка, – с двумя продольными капитальными стенами и окнами, обращенными во двор. Внутренние корпуса, разделяющие дворы, могли быть двухпролетными, с окнами, выходящими на обе стороны. Заметим, что конструктивная схема «с продольными несущими стенами» – изобретение советского периода. В исторической застройке продольные стены всегда развязывались поперечными, в результате чего стены лицевых строений образовывали замкнутые не слишком вытянутые прямоугольники. Устройству поперечных стен в лицевых строениях с нешироким фасадом во многом способствовала необходимость организации обязательного парадного входа с улицы и встроенного проезда. В итоге возникла достаточно жесткая система продольных и поперечных несущих стен. Однопролетные дворовые сооружения весьма уступали в аспекте пространственной жесткости двухпролетным. Характерной их особенностью являлась плохая перевязка межевой (брандмауэрной) стены поперечными, в которых к тому же устраивались дверные проемы для организации коридоров вдоль межевых стен.

Регламентация застройки способствовала тому, чтобы здания получили довольно компактную форму. Если обозначить длину главного фасада  $L$ , его высо-

ту  $H$ , а ширину лицевого строения в поперечном сечении  $B$ , то для лицевых строений с длиной фасада 10 саж. соотношение  $L:H:B$  составляет 1:1:(0,7–0,9); при 15 саж. – 1,5:1:(0,7–0,9); при 20 саж. – 2:1:(0,7–0,9). Очевидно, что строение с такими пропорциями, с конструктивной схемой в виде системы перевязанных продольных и поперечных стен обладает существенной пространственной жесткостью. Это является весьма существенным обстоятельством, во многом объясняющим длительную «живучесть» (эксплуатационную пригодность) исторических зданий, особенно лицевых строений, в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга, для которых характерно наличие мощной толщи (10–25 м) слабых глинистых грунтов под 3–5-метровой естественной песчаной подушкой в основании сооружений.

Регламентация градостроительной деятельности в Санкт-Петербурге привела к формированию достаточно однородной жилой застройки, что в значительной степени облегчает поиск закономерностей ее деформационного поведения при развитии неравномерных осадок.

Изучение истории формирования застройки Санкт-Петербурга наводит на мысль о том, что постепенное увеличение плотности застройки домовладений за счет освоения территории дворов и повышение этажности строений с неизбежностью должны были обуславливать взаимное влияние корпусов как в пределах одного домовладения, так и на смежных участках. Эта особенность застройки должна найти отражение в накопленных деформациях сооружений и картине развития трещин в кирпичных стенах.

### Форма деформации здания и допустимые деформации

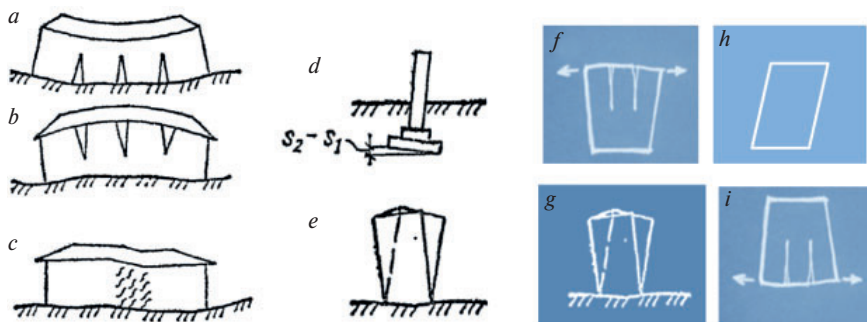
Как известно, в отечественной геотехнической практике различают следующие формы деформаций сооружения (рис. 1,  $a–e$ ): прогиб, выгиб, перекосяк, крен, скручивание, горизонтальные смещения. Возможна комбинация этих форм (Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. Л.: Стройиздат, 1988. 415 с.). Термины «деформация прогиба» или «выгиба» обычно применяют, рассматривая здание в продольном направлении. В поперечном направлении эти термины не вполне уместны, поскольку при обычном соотношении ширины здания  $B$  к высоте  $H$  меньше единицы о прогибах или выгибах говорить не приходится. Поэтому деформацию здания в поперечном сечении, при которой происходит крен фасадных стен поверху наружу, назовем для краткости раскрытием типа «веер вверх» (рис. 1,  $f$ ), а в противном случае, когда наблюдаются смещения наружу понизу обеих фасадных стен – раскрытием типа «веер вниз» (рис. 1,  $i$ ). Кроме того, в попереч-

ном сечении здание может претерпевать кручение и крен в целом (рис. 1,  $g, h$ ).

В отечественных нормах форма деформации характеризуется максимальным или средним значением осадки (вертикального смещения вниз), подъема (вертикального смещения вверх), относительной разности осадок и креном. При этом предельные значения относительного прогиба зданий принимают равными половине значения предельной относительной разности осадок, а относительного выгиба – одной четверти этого значения.

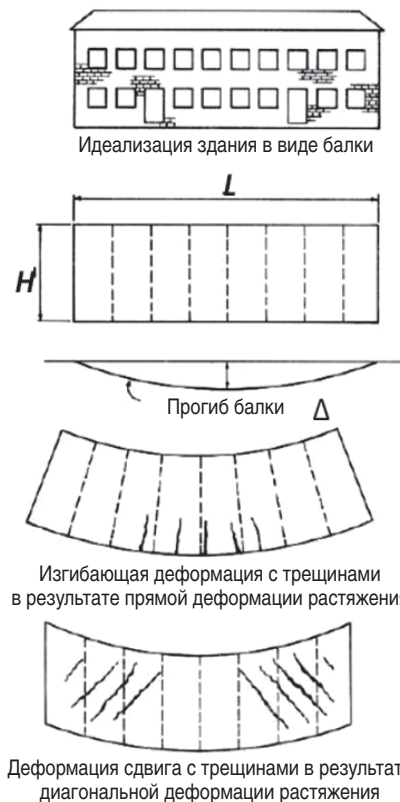
Для строящихся зданий со стенами из кирпичной кладки без армирования современные нормы (СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений», далее – СП 22.13330) относительную разность осадок ограничивают значением 0,002, следовательно, относительный прогиб не должен превышать 0,001, а выгиб 0,0005. Крен при этом не регламентируется, поскольку в данном случае он считается прямым следствием развития неравномерных осадок и при сохранении геометрической формы здания численно равен относительной разности его осадок. Для существующих зданий, претерпевающих реконструкцию, значения относительной разности дополнительных осадок не должны превышать 0,0009 для второй категории технического состояния и 0,0007 для третьей категории. При оценке влияния строительных воздействий на окружающую застройку это значение не должно превышать соответственно 0,0006 и 0,0004 для второй и третьей категорий технического состояния. Отметим, что в отношении дополнительных деформаций действующие нормы не содержат требований снижения относительной неравномерности осадок в зависимости от формы деформации здания (прогиб или выгиб). В результате наблюдается парадоксальная ситуация, когда требования по относительной разности осадок для объектов нового строительства оказываются едва ли не более строгими, чем к дополнительным деформациям исторического здания.

В отличие от дополнительных деформаций существующих зданий предельные значения относительных деформаций вновь возводимых сооружений базировались на вполне ясном физическом обосновании. В основе нормативного критерия лежит концепция, выдвинутая Д.Е. Польшиным и Р.А. Токарем [9] (легла в основу СНиП 1955 г.), согласно которой предельным для относительной разности осадок считается такое значение, при котором в кирпичной или каменной кладке капитальных стен возникают деформации растяжения, приводящие к образованию трещин. При этом предельное значение относительной разности осадок зависит от соотношения длины здания к высоте  $L/H$ . Д.Е. Польшин и Р.А. Токар с использованием критической величины

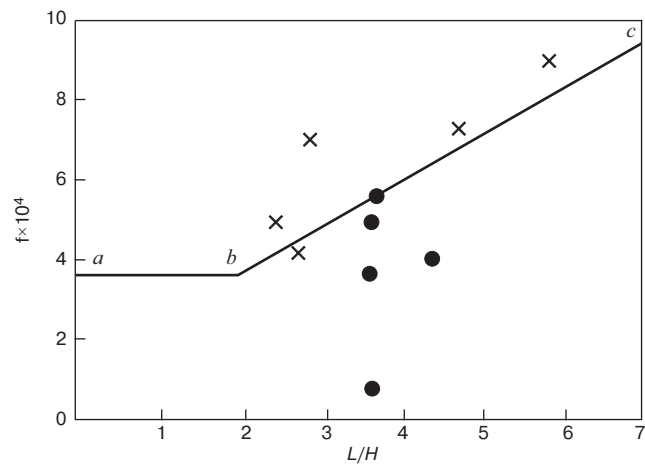


**Рис. 1.** Формы деформаций сооружений: в продольном направлении (по Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты. Л.: Стройиздат, 1988. 415 с.): а – прогиб; b – выгиб; с – перекос; d – крен; e – кручение в поперечном направлении; f – раскрытие «веером вверх»; g – кручение; h – крен; i – раскрытие «веером вниз»

**Fig. 1.** Forms of deformations of structures: in the longitudinal direction (according to Dalmatov B.I. Mechanics of soils, foundations and foundations. L.: Stroyizdat, 1988. 415 p.): a – deflection, b – bending, c – skew, d – roll, e – torsion; in the transverse direction: f – opening «fan up», g – torsion, h – roll, i – opening «fan down»



**Рис. 3.** Моделирование здания с кирпичными стенами с помощью кирпичной балки [1]  
**Fig. 3.** Modeling of a building with brick walls using a brick beam [1]



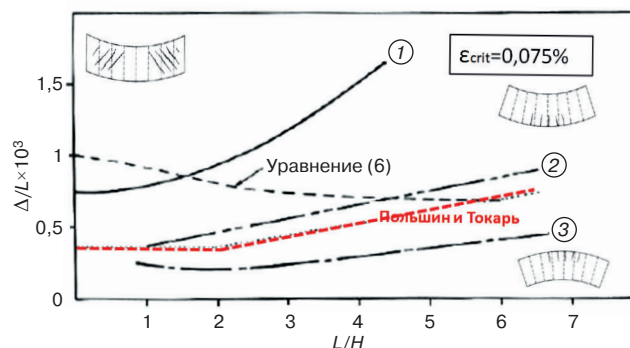
**Рис. 2.** Результаты измерений деформаций фундаментов на естественном основании для десяти кирпичных зданий (● – стены без трещин; × – стены с трещинами) по Д.Е. Польшину, Р.А. Токарю [9]  
**Fig. 2.** The results of measurements of deformations of foundations on a natural base for ten brick buildings (● – walls without cracks; × – walls with cracks) by D.E. Polshin, R.A. Tokar [9]

**Таблица 1**  
**Table 1**

**Пределные деформации сооружений с кирпичными стенами без армирования по Д.Е. Польшину, Р.А. Токарю [9]**  
**Limiting deformations of structures with brick walls without reinforcement according to D.E. Polshin, R.A. Tokar [9]**

Описание сооружения	Пески и глины в твердом состоянии	Глины в пластичном состоянии
Здания с кирпичными стенами без армирования: многоэтажные сооружения при $L/H \leq 3$	0,0003	0,0004
	0,0005	0,0007
одноэтажные сооружения	0,001	0,001

деформации растяжения  $\varepsilon_{crit}=0,05\%$  представили теоретическое соотношение относительной разницы осадок и  $L/H$ , которое описывало предельное состояние при образовании трещин в кирпичных стенах и хорошо соотносилось с наблюдениями для ряда



**Рис. 4.** Сравнение между критериями начала видимого трещинообразования в прямоугольных балках и другими критериями поврежденности при  $\varepsilon_{crit}=0,075\%$  (по Дж. Бёрланду [1]): 1 – диагональная предельная деформация растяжения; 2 – прогиб – нейтральная ось в середине, изгибающая предельная деформация растяжения; 3 – выгиб – нейтральная ось на нижнем конце, изгибающая предельная деформация растяжения  
**Fig. 4.** Comparison between the criteria for the onset of visible cracking in rectangular beams and other damage criteria at  $\varepsilon_{crit}=0.075\%$  (according to J. Berland [1]): 1 – diagonal ultimate tensile strain; 2 – deflection – neutral axis in the middle, bending ultimate tensile strain; 3 – bending – neutral axis at the lower end, bending ultimate tensile strain

зданий (среди которых были сталинские высотки на площадях Смоленской и Восстания, на Воробьевых горах в Москве) (рис. 2, табл. 1).

Следует подчеркнуть, что рассматриваемый критерий относится ко второй группе предельных со-

стояний, т. е. призван обеспечить эксплуатационную пригодность сооружения, а не его прочность, хотя сам критерий, как мы видим, основывается на концепции критической деформации растяжения, спровоцированной неравномерными осадками, при которой начинается трещинообразование. Иными словами, превышение критерия означает риск развития трещин в несущих стенах (чего, конечно же, следует избегать), но все же не потерю несущей способности конструкций. При надлежащем контроле возможно продолжение развития деформации за пределами условий начала трещинообразования (по аналогии с допустимым ограниченным развитием трещин в железобетонных конструкциях).

Дж. Бёрланд [1, 10] отмечал, что средние величины критической (предельной) деформации растяжения  $\varepsilon_{crit}$  находятся в близком интервале численных значений для таких различных по прочности материалов, как кирпичная, каменная кладка и бетон. Для кирпичной и каменной кладки на цементном растворе средние величины  $\varepsilon_{crit}$  находятся в пределах 0,05–0,1%, для железобетона  $\varepsilon_{crit}=0,03–0,05\%$ . Следовательно, критерий критической деформации перспективнее по сравнению с таким параметром, как прочность материала, имеющим существенную разницу значений для перечисленных материалов. Работоспособность концепции критических деформаций растяжения Дж. Бёрланд обосновал на примере простой упругой балки длиной  $L$ , высотой  $H$ , моделирующей здание с кирпичными стенами (рис. 3).

На основании решения С.П. Тимошенко (1957) для прогиба  $\Delta$  балки с нейтральной осью, расположенной посередине сечения, Дж. Бёрланд [1] записал выражение для предельного значения  $\Delta/L$  следующим образом (для изотропного упругого тела с соотношением модуля  $E/G=2(1+\nu)$ , где  $E$  характеризует продольную жесткость балки, а  $G$  – жесткость балки при сдвиге;  $\nu$  – коэффициент Пуассона; принимая  $\nu=0,3$ , получим  $E/G=2,6$ ):

$$\frac{\Delta}{L} = \left(0,167 \frac{L}{H} + 0,65 \frac{H}{L}\right) \varepsilon_{bmax}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{bmax}$  – максимальная изгибающая деформация.

При расположении нейтральной оси по низу балки уравнения для предельного значения  $\Delta/L$  под воздействием изгибающей деформации (**выгиба**) и диагональной деформации при **сдвиге** имеют вид соответственно:

$$\frac{\Delta}{L} = \left(0,083 \frac{L}{H} + 1,3 \frac{H}{L}\right) \varepsilon_{bmax} \quad (4)$$

и

$$\frac{\Delta}{L} = \left(0,064 \frac{L^2}{H^2} + 1\right) \varepsilon_{dmax}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{dmax}$  – максимальная диагональная деформация.

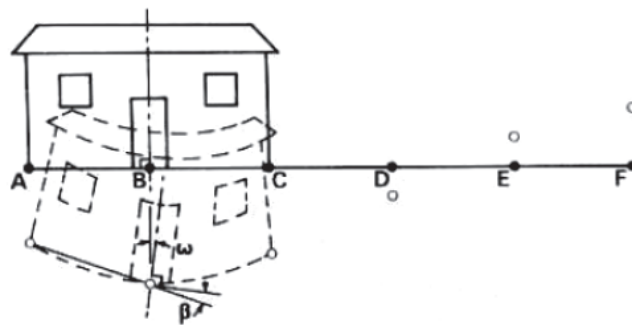


Рис. 5. Определение крена  $\omega$  и относительного вращения (углового отклонения)  $\beta$  (по Дж. Бёрланду [1])

Fig. 5. Definitions of the roll  $\omega$  and relative rotation (angular deviation)  $\beta$  (according to J. Berland [1])

На рис. 4 уравнению (5) соответствует кривая 1 (иллюстрирующая начало образования трещин вследствие диагональных деформаций растяжения при сдвиге), уравнению (3) – кривая 2 (при прогибе), а уравнению (4) – кривая 3 (при выгибе).

Дж. Бёрланд приводит также для сравнения критерий Скемптона–Макдональда [11], который был получен на основании обобщения данных натурных измерений по 98 зданиям со стальным и железобетонным каркасом и кирпичными стенами, из которых 40 имели признаки повреждений. Скемптон и Макдональд предположили, что угловое отклонение  $\beta$  может использоваться как критерий повреждений, и рекомендовали  $\beta=0,002$  как подходящую предельную величину (угловое отклонение  $\beta$  описывает вращение прямой линии, соединяющей две точки привязки, по отношению к крену, см. рис. 5).

Л. Бьеррум [12] принял эту величину как безопасный предел для зданий, где трещины недопустимы. Данный критерий был разработан для каркасных конструкций с заполнением, где преобладает сдвиг, но он широко применялся и к другим видам конструкций. Применяя данный критерий к рассматриваемому случаю простой балки, где упругая балка деформируется из-за сдвига и изгиба, а нейтральная ось находится в середине, Дж. Бёрланд показал, что угловое отклонение  $\beta$  соотносится с  $\Delta/L$  в соответствии с выражением:

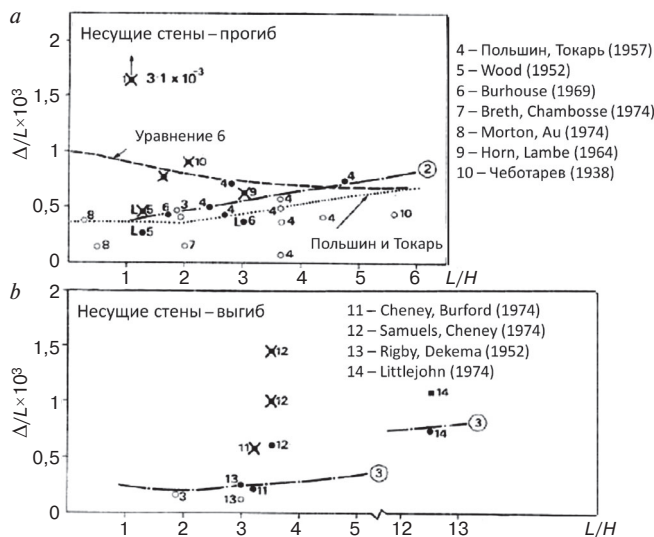
$$\frac{\Delta}{L} = \frac{\beta}{3} \frac{1+3,9\left(\frac{H}{L}\right)^2}{1+2,6\left(\frac{H}{L}\right)^2}. \quad (6)$$

Разместив графики выражений (3)–(6) на одной координатной плоскости и добавив к ним критерий Польшина–Токаря, нетрудно убедиться в том, что последний наилучшим образом соотносится с критериями (3)–(5), построенными для идеализированной модели здания в виде простой балки, при этом он оказывается более консервативным для случая прогиба, но менее строгим при выгибе кирпичной конструкции.

Таблица 2  
Table 2

**Принятая классификация ущерба для памятников античности и эпохи Возрождения при устройстве линии метро «С» в Риме [13]**  
**The accepted classification of damage to monuments of antiquity and the Renaissance during the construction of the metro line C in Rome [13]**

Категория ущерба	Степень разрушения	Раскрытие трещин, мм	Деформация растяжения
0	Незначительная	<0,4	<0,00004
1	Очень небольшая	0,4–0,6	0,00004–0,0006
2	Небольшая	0,6–1	0,0006–0,001
3	Умеренная	1–2	0,001–0,002
4–5	Сильная или очень сильная	2–5	>0,002



**Рис. 6.** Соотношения между  $\Delta/L$  и  $L/H$  для зданий с несущими стенами, показывающих разные степени повреждений (по Дж. Бёрланду [1]): а – деформация прогиба; б – деформация выгиба. Пронумерованные кривые относятся к теоретическим критериям, показанным на рис. 4. Точки с номерами 4–14 – практические примеры развития трещин в зданиях по данным различных исследователей (○ – нет повреждений; ● – незначительные повреждения; × – существенные повреждения)

**Fig. 6.** The ratios between  $\Delta/L$  and  $L/H$  for buildings showing different degrees of damage for buildings with bearing walls (according to J. Berland [1]): а – deflection deformation; б – bending deformation. The numbered curves refer to the theoretical criteria shown in Fig. 4. Points numbered 4–14 – practical examples of the development of cracks in buildings according to various researchers (○ – no damage; ● – minor damage; × – significant damage)

При сравнительно компактных зданиях с соотношением длины к высоте  $L/H \leq 2-3$  конструкция претерпевает сдвиговые деформации с развитием диагональных трещин, при более протяженных зданиях преобладают деформации прогиба (рис. 4).

Не будет лишним также упомянуть предостережение Дж. Бёрланда о том, что для здания с кирпичными несущими стенами особенно опасны деформации в виде выгиба, когда небезопасен даже критерий Польшина–Токаря [1].

На основании сопоставления графиков, изображенных на рис. 4, и практических примеров деформирования зданий, представленных различными исследователями, Дж. Бёрланд пришел к выводу о работоспособности критерия критических деформаций растяжения (рис. 6).

Позднее, в 1995 г. предложенные Дж. Бёрландом критерии получили применение и дальнейшее развитие при строительстве линии метрополитена «С» в Риме, проходящей под многими памятниками античности и эпохи Возрождения. М. Ямиолковский на основе разработок Дж. Бёрланда предложил классификацию ущерба для архитектурных памятников (табл. 2) [13]. Поскольку деформации растяжения имеют тот же порядок, что и относительная неравномерность осадок, нетрудно убедиться, что ограниче-

ния современных отечественных норм (СП 22.13330) по дополнительным деформациям исторических зданий и памятников (0,0006 для II и 0,0004 для III технического состояния) соответствуют категории ущерба 1 по М. Ямиолковскому (очень небольшой степени разрушения, для которой характерно приращение раскрытия трещин до 0,4–0,6 мм).

Рассмотрим теперь, какую полезную информацию о накопленных осадках и форме деформаций может дать массив данных, полученных в ходе массового обследования зданий исторического центра Санкт-Петербурга.

**Краткая информация о методике обследования**

Целью программы по обследованию исторической застройки центра Санкт-Петербурга была оценка технического состояния жилых зданий и определение необходимости постановки их на капитальный ремонт. Очевидно, что прямые методы диагностики технического состояния жилых зданий с помощью выполнения достаточного количества зондажей и вскрытий в условиях непрекращающейся эксплуатации были невозможны. Приходилось изыскивать способы «неинвазивной» диагностики строительных конструкций. Вполне эффективным методом такого рода в 1990-е гг. была фиксация трещин на фасадах зданий с оценкой давности их возникновения. Существовали даже приемы такой оценки (острые края и «чистота» трещины свидетельствовали о ее недавнем происхождении, а сглаженные края закопченной трещины говорили о ее солидном возрасте). Однако благодаря программе ремонта, реализованной по инициативе губернатора В.И. Матвиенко, фасады многих исторических домов привели в порядок, в результате чего были стерты и следы деформаций. Со временем старые трещины стали снова проявляться на отремонтированных фасадах в виде волосных и миллиметровых трещин, но что таится под штукатур-

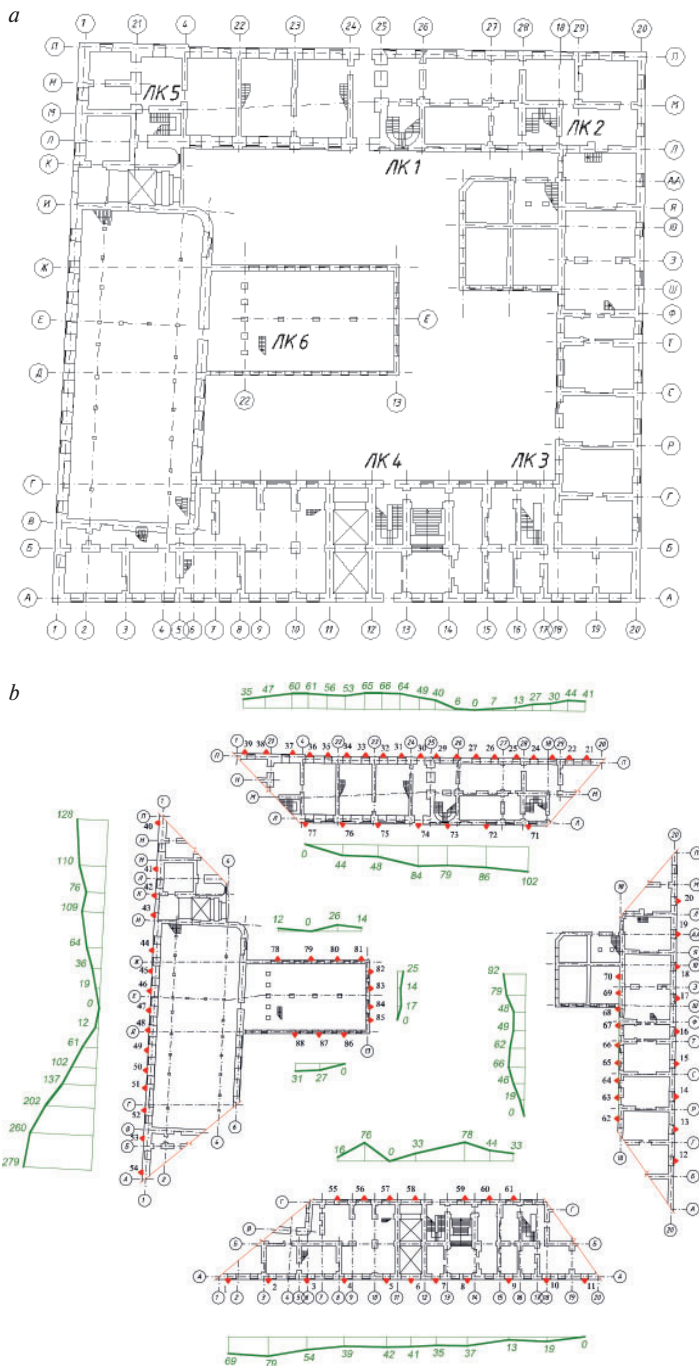


Рис. 7. План первого этажа (а) и накопленная неравномерность осадок, определенная по уровню верха цоколя (б) здания по адресу: Миллионная ул., д. 5, лит. А

Fig. 7. The ground floor plan (a) and the accumulated unevenness of settlements, determined by the level of the top of the basement (b) of the building on 5, Millionnaya str., lit. A

ным слоем в кирпичной кладке стен, стало загадкой. Итак, картина видимых трещин на стенах здания теперь не позволяет составить адекватное представление о его накопленных деформациях.

В распоряжении исследователя остается, пожалуй, единственный доступный способ оценки – определение накопленной неравномерности осадок путем нивелирования маркирующих уровней, кото-

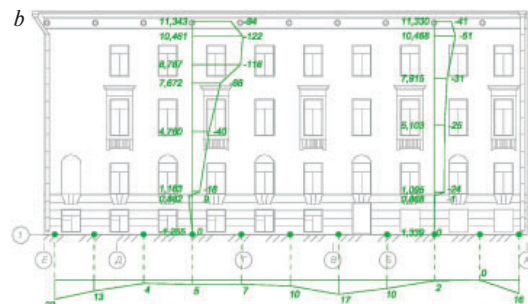


Рис. 8. Крыны и накопленные неравномерные осадки фасадной стены здания по адресу: Галерная ул., д. 56, лит. А (знак «-» на этюре крена означает крен стены поверху в направлении «от улицы»)

Fig. 8. Rolls and accumulated uneven settlement of the facade wall of the building at 56, Galernaya Street, lit. A (the «-» sign on the roll plot means the roll of the wall on top in the direction «from the street»)

рые, вероятнее всего, выполнялись горизонтальными при строительстве здания. В качестве таких уровней можно использовать линии верха цоколя, карниза, горизонтальных граней оконных проемов. В пользу их изначальной горизонтальности говорит многовековой (если не многотысячелетний) опыт строительной деятельности (гидроуровень был знаком еще строителям Древнего Египта). Конечно, погрешности могли существовать, но отклонения от горизонтали едва ли были значительными, и тем более сомнительно, чтобы они могли носить системный характер, способный запутать современного исследователя. Поэтому отклонения от горизонтали маркирующих уровней, скорее всего, свидетельствуют о

накопленной неравномерности осадки здания. Конечно, такой подход неидеален: цоколь мог перекаладываться, карниз рихтоваться, а оконные проемы перетесываться. Однако, как показал опыт работы специалистов института «Геореконструкция», такого рода корректировки хорошо заметны, особенно по цоколю. Последний не часто перекаладывался, обычно фрагментарно ремонтировался. Поэтому цоколь

оказался наиболее показательным маркирующим уровнем для оценки накопленной неравномерности осадок здания в плоскости фасадов.

О деформациях здания «из плоскости» фасадов, с аналогичными оговорками, может свидетельствовать измерение накопленного крена стен (применение отвеса также известно из глубины веков).

На рис. 7 и 8 приведены характерные измерения накопленной неравномерности осадок и кренов для исторических зданий в Адмиралтейской части Санкт-Петербурга.

### Результаты определения накопленной неравномерности осадок

По единой программе было обследовано техническое состояние строений, расположенных на четырехстах домовладениях (участках) в историческом центре Санкт-Петербурга. Рассмотрим результаты определения накопленных неравномерных осадок для представительной выборки строений в районе Миллионной ул. (Марсово поле – Миллионная ул. – Дворцовая наб., см. рис. 9), а также в районе Галерной ул. (наб. Адмиралтейского канала – Галерная ул. – Английская наб., см. рис. 10), где сплошная брандмауэрная застройка сформировалась к пушкинскому времени, хотя и претерпевала некоторые изменения в дальнейшем. Каждый район содержит выборку из четырнадцати адресов домовладений, в пределах которых в районе Миллионной ул. расположено 37 трех–пятиэтажных строений, а в районе Галерной ул. – 50 подобных строений.

При рассмотрении формы деформирования исторической застройки прежде всего обращает на себя внимание факт преобладания деформаций выгиба зданий в продольном направлении. Для района Миллионной ул., где соотношение  $L/H$  находится в диапазоне от 1,5 до 4, этот вид деформаций наблюдается у 47% строений (рис. 11, а). Для района Галерной ул., где ширина домовладения по красной линии улиц была, как отмечалось выше, меньше, чем на Миллионной ул., и  $L/H=1-2$ , выгиб наблюдается у 28% строений (рис. 12, а), а еще у 21% строений наблюдается своего рода крен с выгибом (когда экстремум эпюры накопленных осадок с выпуклостью вверх находится у края строения). Такая форма деформации наблюдается обычно у строения с соотношением  $L/H$ , близким к единице, которое в силу узости фасада не проявляет деформаций выгиба в «классическом виде». В сумме эти две формы деформаций, характеризующиеся выпуклой вверх эпюрой накопленных осадок, составляют 49%. Таким образом, для обоих районов деформации выгиба наблюдаются почти в половине случаев.

Для застройки в районе Миллионной ул. для 30% строений характерна деформация в поперечном се-



Рис. 9. Район Миллионной ул. (Марсово поле – Миллионная ул. – Дворцовая наб.) с обозначением номеров домовладений, попавших в выборку

Fig. 9. The area of Millionnaya St. (Field of Mars – Millionnaya St. – Dvortsovaya Nab.) with the designation of the numbers of households included in the sample

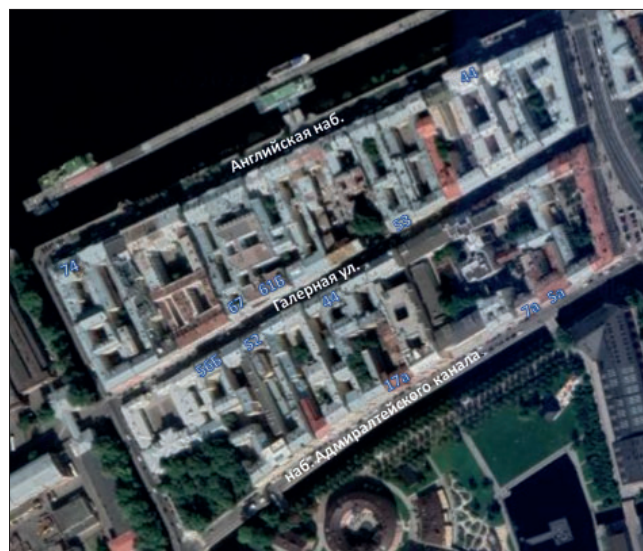


Рис. 10. Район Галерной ул. (наб. Адмиралтейского канала – Галерная ул. – Английская наб.) с обозначением номеров домовладений, попавших в выборку

Fig. 10. The area of Galernaya St. (Admiralteysky can. Emb. – Galernaya St. – English Emb.) with the designation of the numbers of households included in the sample

чении в виде раскрытия «веером вверх» (рис. 1, б). Эта доля еще более увеличится, если из выборки исключить строения, для которых не удалось установить крен обеих наружных стен (для брандмауэрных стен измерения крена возможны только в том случае, если на соседнем участке отсутствуют примыкающие к ней строения). Для строений в районе Галерной ул., в силу их компактности, более характерен крен поперечного сечения здания в целом (25% случаев, см. рис. 12, б) и в меньшей степени в виде раскрытия «веером вниз» (15% случаев). Тем не менее форма деформаций в виде раскрытия «веера вверх» в обеих выборках прослеживается для значительной доли строений.

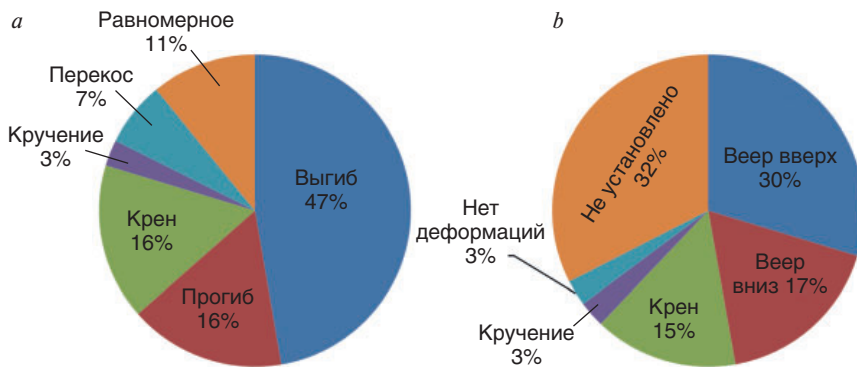


Рис. 11. Соотношение различных форм деформаций исторических строений в районе Миллионной ул.: а – в продольном направлении; б – в поперечном сечении  
Fig. 11. The ratio of various forms of deformations of historical buildings in the area of Millionnaya St.: a – in the longitudinal direction; b – in the cross section

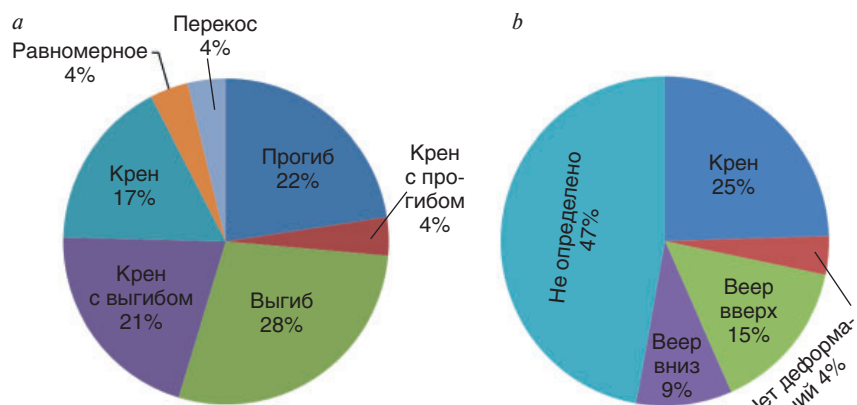


Рис. 12. Соотношение различных форм деформаций исторических строений в районе Галерной ул.: а – в продольном направлении; б – в поперечном сечении  
Fig. 12. The ratio of various forms of deformations of historical buildings in the area of Galernaya St.: a – in the longitudinal direction; b – in the cross section

Итак, для значительной части петербургской исторической застройки характерны наиболее опасные формы деформаций в виде выгиба в продольном направлении и «веера вверх» в поперечном сечении.

Данные, полученные в результате обследований, позволяют проанализировать наличие зависимости не только между относительной неравномерностью осадки  $\Delta S/L$  и отношением длины к высоте строения  $L/H$  (рис. 13, а), о которых шла речь выше, но и между креном фасадных стен  $i$  и отношением высоты строения к его ширине в поперечном сечении  $B/H$  (рис. 13, с). Естественно было бы предполагать возрастание накопленной относительной неравномерности осадок при увеличении  $L/H$ , а также возрастание крена стен при росте  $B/H$ . Кроме того, было бы оправданно ожидать возрастание крена стен при росте относительной неравномерности осадок и наоборот (рис. 13, б), а также роста последней при увеличении высоты строений (рис. 13, д).

Кроме того, резонно полагать, что неравномерность накопленных осадок должна быть тем выше, чем больше скорость развития осадок исторического здания. Конечно же, мониторинг осадок исторических зданий на протяжении их вековой (или многовековой) истории не проводился. Однако для поддержания корректности городской высотной сети (репера которой установлены на цоколях зданий, подверженных осадкам) раз в 20–30 лет с 1773 г. проводились повторное нивелирование геодезических знаков. В.А. Васенин привел все двенадцать нивели-

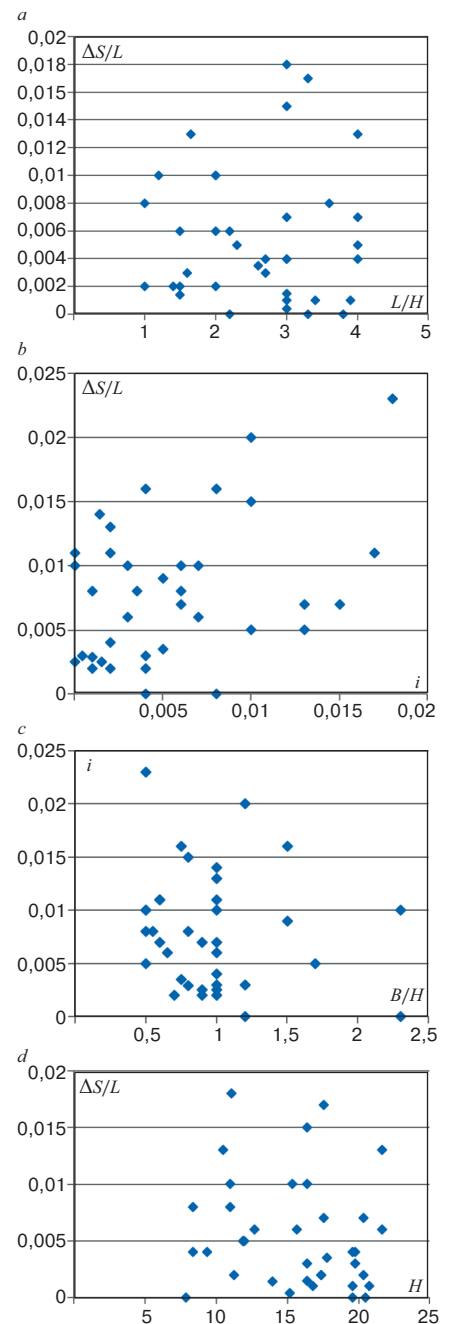


Рис. 13. Накопленные деформации исторической застройки для района Миллионной ул.: а – зависимость относительной неравномерности осадки от соотношения длины здания к высоте; б – зависимость относительной неравномерности осадки от крена из плоскости фасадных стен; с – зависимость крена из плоскости фасадных стен от соотношения ширины здания к высоте; д – зависимость относительной неравномерности осадки от высоты здания  
Fig. 13. Accumulated deformations of historical buildings for the Millionnaya St. area: a – dependence of relative unevenness of settlement on the ratio of building length to height; b – dependence of relative unevenness of settlement on roll from the plane of facade walls; c – dependence of roll from the plane of facade walls on the ratio of building width to height; d – dependence of relative unevenness of settlement from the height of the building

ровок, выполненных на протяжении полутора веков, к единой системе и тем самым превратил репера в геодезические марки, показывающие скорость развития осадок здания (на котором они установлены) во времени [14]. В результате обработки нивелировок по 5 тыс. реперов выяснилось, что осадки исторического здания в Санкт-Петербурге, расположенного вдали от набережных и объектов нового строительства (на земле и под землей), не превышают 0,5 мм/год, а здания на набережных претерпевают осадки со скоростью 1–2,5 мм/год (рис. 14). Наибольшие скорости развития осадок характерны для случаев влияния нового соседнего строительства и – особенно – в зонах строительства сооружений метрополитена. Установлено, что развитие осадок во времени сопровождается увеличением относительной неравномерности осадок.

Как демонстрируют облака точек, приведенные на рис. 13 и 14 для района Миллионной ул., на практике не наблюдается ни одной из этих предполагаемых зависимостей (аналогичная ситуация характерна и для района Галерной ул.). Очевидно, причину отсутствия этих зависимостей следует искать не только в истории возведения отдельного здания, но и в последовательности застройки сопредельных участков во времени (пример такой последовательности приведен на рис. 15). Перестраиваемые и надстраиваемые дворовые корпуса оказывали влияние на ранее возведенные лицевые строения, что способствовало развитию деформаций последних в форме выгиба.

Но самый большой сюрприз ожидает нас, когда мы, наконец, обратим внимание на численные значения накопленных относительных деформаций. На рис. 16 представлено поле точек в координатах ( $\Delta S/L$ ;  $L/H$ ) для всех восьмидесяти семи строений, обследованных в районах Миллионной и Галерной улиц. Нетрудно убедиться, что относительная неравномерность осадок для подавляющего большинства строений оказывается существенно выше критериев, установленных российскими нормами, а также выше любых рассмотренных ранее в п. 2 критериев (рис. 4) и случаев из практики (рис. 6).

Как нетрудно убедиться, в отношении выгиба нормативный критерий превышен в основном в 10–20 раз,

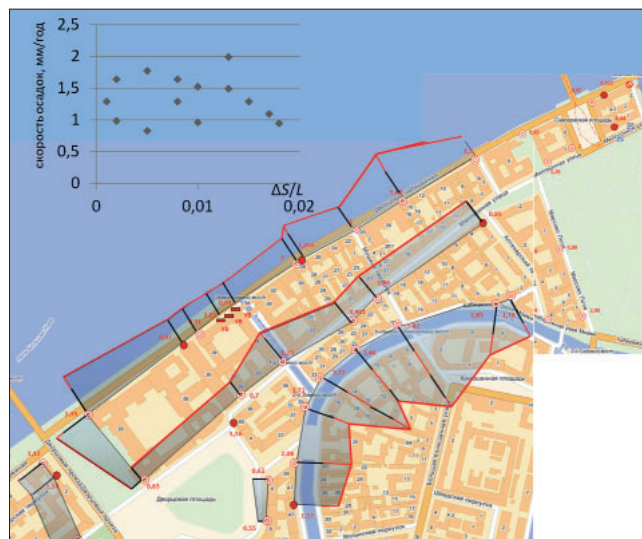


Рис. 14. Карта текущих скоростей развития осадок во времени, определенная В.А. Васениным по реперам городской нивелирной сети для Адмиралтейской части (район Миллионной ул.), и зависимость относительной неравномерности осадки от текущей скорости развития осадок для зданий

Fig. 14. A map of the current rates of settlements development over time, determined by V.A. Vasenin based on the benchmarks of the urban leveling network for the Admiralteyskaya part (Millionnaya St. area) and the dependence of the relative unevenness of settlement on the current rate of precipitation development for buildings

по некоторым объектам – в 40 раз, а в отношении прогиба – в 5–20 раз. При этом обследование зданий не выявило в зданиях признаков аварийности, они продолжают эксплуатироваться без жалоб на состояние конструкций со стороны жителей и пользователей. Для части из них была признана необходимость постановки на плановый капитальный ремонт, но ни для одного из них не требовалось немедленного противоаварийного вмешательства.

Таким образом, «живучесть» исторических зданий оказывается как минимум на порядок выше нормативных критериев по относительной неравномерности осадок. Это свидетельствует о том, что исторические здания с кирпичными несущими стенами при надлежащем уходе за ними, ремонте трещин способны сохранить свою эксплуатационную способность на протяжении веков. До 1917 г. у каждого дома был свой хозяин, заинтересованный в обеспечении эксплуатационной пригодности и механической без-

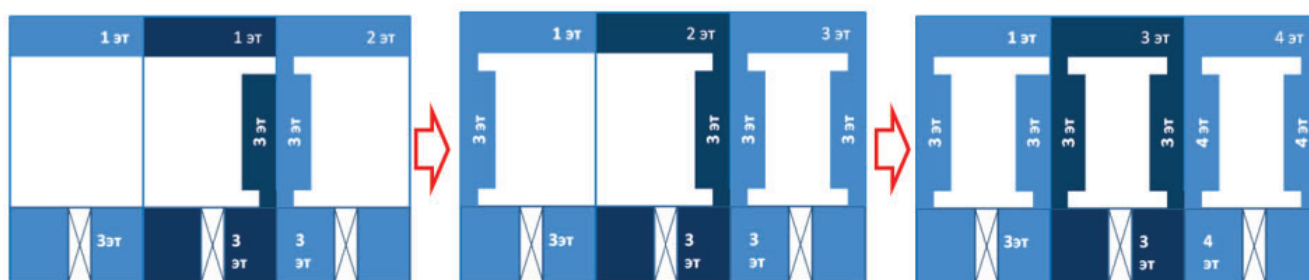


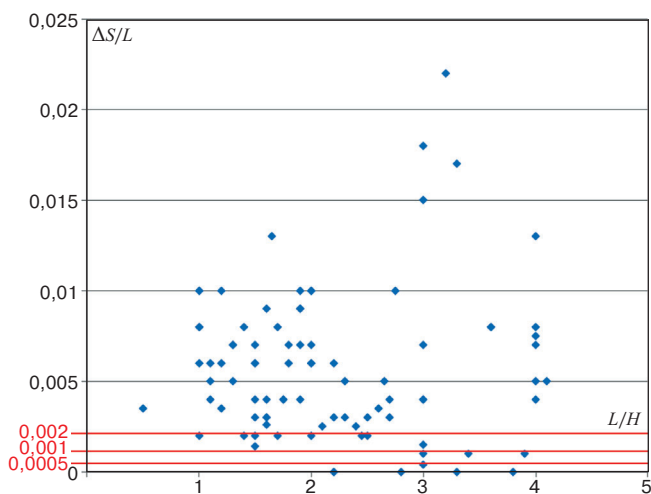
Рис. 15. Характерная последовательность застройки городской территории, обуславливающая развитие деформаций выгиба  
Fig. 15. The characteristic sequence of urban development that causes the development of bending deformations

Таблица 3  
Table 3

**Предельные дополнительные деформации основания фундаментов сооружений окружающей исторической застройки и памятников, расположенных в зоне влияния нового строительства или реконструкции**  
**Marginal additional deformations of the foundations of the structures of the surrounding historical buildings and monuments located in the zone of influence of new construction or reconstruction**

Кирпичные здания стеновой конструктивной схемы	Накопленная относительная неравномерность осадок, $\Delta S/L$	Накопленный крен наружных стен, $i$	Скорость развития осадок, мм/год	Категория технического состояния здания	Предельные дополнительные деформации основания фундаментов		Предельное приращение крена наружных стен, $i_u$
					Относительная разность осадок, $(\Delta S/L)_u$	Максимальная осадка $S_u$ , см	
Исторические здания	$\leq 0,002$	$\leq 0,002$	$\leq 0,5$	I	0,002	4	0,004
	$\leq 0,005$	$\leq 0,005$	$\leq 1$	II	0,001	3	0,002
	$\geq 0,005$	$\geq 0,005$	$\geq 1$	III	0,0007	1	0,002
Объекты культурного наследия	–	–	–	I	–	–	0,002
	$\leq 0,005$	$\leq 0,005$	$\leq 0,5$	II	0,0006	1	0,001
	$\geq 0,005$	$\geq 0,005$	$\geq 0,5$	III	0,0004	0,5	0,001

**Примечание.** Предельные значения относительного выгиба зданий принимают равными  $0,5(\Delta S/L)$  по отношению к значениям, указанным в табл. 3.



**Рис. 16.** Результаты определения относительной неравномерности осадок в зависимости от отношения длины здания к высоте для 87 обследованных строений в районах Миллионной и Галерной улиц (красные линии обозначают нормативные предельные значения относительной разности осадок для кирпичных зданий с кладкой без армирования – 0,002; то же при прогибе – 0,001; то же при выгибе – 0,0005)

**Fig. 16.** Results of determining the relative unevenness of settlements and the ratio of building length to height for 87 surveyed buildings in the areas of Millionnaya St. and Galernaya St. (red lines indicate the normative limit values of the relative difference in settlement for brick buildings with masonry without reinforcement – 0.002; the same for deflection – 0.001; the same for bending – 0.0005)

опасности собственной недвижимости. В советское время более трех тысяч исторических зданий были капитально отремонтированы по проектам института ЛенжилНИИпроект [15]. Для сохранности исторического центра необходимо следить за обеспечением механической безопасности застройки города.

**Заключение: о регламентации предельных дополнительных осадок городской застройки**

Выявленный факт превышения накопленными осадками значений предельных осадок без потери

эксплуатационной способности зданий совсем не означает того, что следует смягчать действующие нормативные критерии. Известные ограничения СП 22.13330 по дополнительным деформациям должны оставаться руководящим условием, определяющим выбор конструктивных решений фундаментов и подземных частей объектов соседнего нового строительства, объектов реконструкции и приспособления памятников для современного использования.

Несмотря на ясный физический смысл формулировки дополнительных воздействий на историческую застройку в терминах деформаций растяжения (что обсуждалось выше), представляется целесообразным на этапе проектирования сохранить привычную существующую систему ограничений дополнительных деформаций (табл. Е.1 и К.1 СП 22.13330). Последние следует рассматривать (по принципу работы светофора) в качестве желтого сигнала, обеспечивающего безопасность принятия решений на стадии проектирования.

Эти ограничения должны побуждать к выбору щадящих проектных решений и технологий ведения работ, позволяющих свести к приемлемому минимуму строительные воздействия на существующую застройку. В этом аспекте принятые в СП 22.13330 ограничения дополнительной осадки для соседних зданий с кирпичной кладкой без армирования следует признать вполне соответствующими цели обеспечения сохранности существующей застройки. Следовало бы несколько уточнить ограничения по неравномерности дополнительных осадок и ввести ограничения на приращение крена из плоскости стен.

Представляется целесообразным, например, по аналогии с предельными деформациями объекта нового строительства ввести понижающий коэффициент (допустим, равный 0,5) к табличным значени-

ям для наиболее опасной формы деформирования – для выгиба. В этом случае в табл. К.1 действующей редакции СП 22.13330 (в редакции 2023 г.), посвященной предельным дополнительным деформациям окружающей застройки, следовало бы добавить примечание, сходное с имеющимся под табл. Г.1 (которая относится к объектам нового строительства): «Предельные значения относительного выгиба зданий, указанных в пп. 3 и 5 таблицы, принимают равными  $0,5 \Delta S/L$ ». В этом случае для категории II технического состояния здания приращение деформаций выгиба ограничивается значением 0,0003, а для категории 3 – 0,0002.

Эти предельные значения неплохо коррелируют с предложениями Дж. Бёрланда и М. Ямиолковско-го, сделанными ими для существующей застройки в Риме при проектировании линии метро «С» (табл. 2) [13]. Предлагаемое выше ограничение прироста относительной неравномерности осадок соответствует категории ущерба II (небольшой степени разрушения) по классификации М. Ямиолковского и его коллег.

Целесообразно было бы также ввести ограничения по крену фасадных стен из плоскости, приняв предельные значения дополнительных кренов, например по петербургским геотехническим нормам ТСН 50-302–2004 «Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге». Предлагаемые изменения сведены в табл. 3.

В табл. 3 предлагается прежде всего разделить кирпичные здания рядовой застройки со стеновой конструктивной схемой (которые в СП 22.13330 именуются «многоэтажными зданиями и одноэтажными зданиями исторической застройки или памятниками истории, архитектуры и культуры с несущими стенами из кирпичной кладки без армирования») в соответствии со статусом охраны на исторические здания и объекты культурного наследия. В действующей редакции СП 22.13330 при назначении предельных значений дополнительных деформаций многоэтажные здания с кирпичными стенами без армирования упоминаются дважды (см. графы 3 и 5 в табл. К.1 СП 22.13330), при этом в графе 5 объединены и памятники и «исторические» здания, не имеющие этого статуса. Следовало бы оставить требования графы 5 только для памятников, а требования графы 3 распространить на исторические здания. Для такого изменения имеются веские основания: практически все здания, построенные в XVIII в. и ранее, в абсолютном большинстве уже признаны объектами культурного наследия, а прочие дореволюционные здания, которые по петербургскому законодательству принято считать историческими, имеют возраст не более 150–200 лет, и именно для них были разработаны

критерии, отраженные в петербургских региональных нормах (ТСН 50-302–2004), которые подобны указаниям графы 3 табл. К.1 СП 22.13330. При реализации такого изменения преодолевается необоснованное отождествление требований для памятников и исторических зданий (объекты культурного наследия должны быть защищены более строгими ограничениями по дополнительным деформациям, чем прочие здания), а также необоснованное разделение кирпичных зданий со стеновой конструктивной схемой на «исторические» здания и прочие, отмеченные в графе 3 табл. К.1 СП 22.13330.

Во-вторых, при назначении категории технического состояния здания следует учитывать накопленную неравномерность осадок и (или) крен наружных стен, которые существенным образом уточняют и дополняют результаты стандартного обследования (эти графы выделены в таблице розовым маркером). Кроме того, следует учитывать скорость развития деформаций здания. В-третьих, необходимо дополнить перечень предельных деформаций здания значениями кренов наружных стен, как это практиковалось в петербургских ТСН 50-302–2004 (эта графа выделена в таблице желтым маркером). При этом для памятников приращение кренов может быть вдвое ниже, чем для исторических зданий, не имеющих статуса объектов культурного наследия.

Итак, при соблюдении критерия (2) дополнительные деформации, приведенные в табл. 3, можно действительно считать соответствующими небольшой степени разрушения, что не требует расчетов соседних зданий на дополнительные воздействия от нового строительства. При этом весьма полезно учитывать форму накопленных деформаций исторического здания, особенно обращая внимание на деформации в виде выгиба.

К критериям ограничений, основанным на критической деформации растяжения, разумно переходить в том случае, если, несмотря на принятие обоснованных проектных решений по устройству фундаментов и подземной части здания и щадящие технологии их строительства, на практике сложилась нештатная ситуация и произошли «сверхнормативные» деформации существующей застройки (этот важный аспект планируется осветить в отдельной публикации). В этом случае не обойтись без детального анализа напряженно-деформированного состояния соседних строений.

#### Список литературы / References

1. Burland J.D., Wroth C.P. Settlement of buildings and associated damage. *State-of-the-Art Review. Proc. Conf. Settlement of Structures*. Cambridge: Pentech Press. London. 1974, pp. 611–654.

2. Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. Совместные расчеты системы «основание – здание» // *Труды конф. РОМГГиФ*. М., 2007. Т. 2. С. 307–312.
2. Ulitsky V.M., Shashkin A.G., Shashkin K.G. Joint calculations of the «foundation – building» system. *Proceedings of the conf. ROMGGiF*. Moscow. 2007. Vol. 2, pp. 307–312.
3. Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г. Взаимодействие зданий и оснований. *Геотехника*, 2009. № 1. С. 6–19.
3. Ulitsky V.M., Shashkin A.G., Shashkin K.G. Interaction of buildings and foundations. *Geotechnica*. 2009. No. 1, pp. 6–19. (In Russian).
4. Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Шашкин В.А. Основы совместных расчетов зданий и оснований. СПб.: Геореконструкция. 2014. 328 с.
4. Ulitsky V.M., Shashkin A.G., Shashkin K.G., Shashkin V.A. Monitoring of buildings and structures during construction and operation [Fundamentals of joint calculations of buildings and grounds]. Saint Petersburg: Georekonstrukciya. 2014. 328 p.
5. Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Богов С.Г., Шашкин В.А., Шашкин М.А. Мониторинг зданий и сооружений при строительстве и эксплуатации. СПб.: Геореконструкция, 2021. 640 с.
5. Shashkin A.G., Shashkin K.G., Bogov S.G., Shashkin V.A., Shashkin M.A. Monitoring of buildings and structures during construction and operation. Saint Petersburg: Georeconstruction. 2021. 640 p.
6. Шашкин А.Г., Шашкин В.А. Регламентация градостроительной деятельности в Санкт-Петербурге в XVIII–XIX вв. и ее технические следствия // *Жилищное строительство*. 2023. № 9. С. 86–101. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-9-86-101>
6. Shashkin A.G., Shashkin V.A. Reglamentation of urban planning activities in St. Petersburg in the 18<sup>th</sup>–19<sup>th</sup> centuries and its technical consequences. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2023. No. 9, pp. 86–101. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-9-86-101>
7. Семенов С.В. Формирование принципов сохранения архитектурно-градостроительного наследия Санкт-Петербурга на основе закономерностей трехвекового градостроительного развития // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Искусствоведение*. 2013. Вып. 2. С. 190–211.
7. Sementsov S.V. Formation of principles of preservation of architectural and urban heritage of St. Petersburg on the basis of patterns of three-century urban development. *Vestnik of St. Petersburg University. Art history*. 2013. Iss. 2, pp. 190–211. (In Russian).
8. Семенов С.В. Градостроительная составляющая жилой функции Санкт-Петербурга и Санкт-Петербургской агломерации 1703–2006 гг. // *Вестник Санкт-Петербургского университета. История*. 2007. Вып. 3. С. 63–70.
8. Sementsov S.V. The town-planning component of the residential function of St. Petersburg and the St. Petersburg agglomeration of 1703–2006. *Vestnik of St. Petersburg University. Story*. 2007. Iss. 3, pp. 63–70. (In Russian).
9. Polishin D.E. and Tokar R.A. Maximum allowable non-uniform settlement of structures. *Proceedings 4<sup>th</sup> Int. Conference On Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Butterworth's scientific: London. UK. 1957. Vol. 1, pp. 402–404.
10. Burland J.B., Broms B.B., De Mello V.F.B. Behaviour of foundations and structures. *Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo*. Japan. 1977, pp. 495–546.
11. Skempton A. W. and McDonald D.H. The allowable settlements of buildings. *Proceedings Institution of Civil Engineers*. 1956. Part III. Vol. 5 (No. 50), pp. 727–768.
12. Bjerrum L. Allowable settlement of structures. *Proceedings European conference on soil mechanics and foundation engineering. Wiesbaden. Deutsche Gesellschaft für Erd-und Grundbau e. V.* 1963. 15–18 October. Vol. 3, pp. 135–137.
13. Бургиноли А., Ямиолковский М., Виджиани К. Применение геотехники как компонента междисциплинарного подхода для сохранения исторических городов и памятников // *Развитие городов и геотехническое строительство*. 2010. № 1. С. 1–45.
13. Bourguignoli A., Yamiolkovsky M., Vigiani K. Application of geotechnics as a component of an interdisciplinary approach for the preservation of historical cities and monuments. *Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*. 2010. No. 1, pp. 1–45. (In Russian).
14. Шашкин А.Г., Васенин В.А. Вековые осадки зданий Санкт-Петербурга. СПб.: Геореконструкция, 2022. 440 с.
14. Shashkin A.G., Vasenin V.A. Vekovye osadki zdaniy Sankt-Peterburga [Age-old precipitation of buildings in St. Petersburg]. Saint Petersburg: Georekonstrukciya. 2022. 440 p.
15. Шарлыгина К.А. Опыт реконструкции исторических жилых зданий Санкт-Петербурга. СПб.: Петрополис, 2019. 136 с.
15. Sharlygina K.A. Opyt rekonstruktsii istoricheskikh zhidykh zdaniy Sankt-Peterburga [Experience of reconstruction of historical residential buildings of St. Petersburg]. Saint Petersburg: Petropolis. 2019. 136 p.

УДК 711.4-112

DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-46-59>

М.А. СЛЕПНЕВ, канд. техн. наук, доцент (SlepnevMA@mgsu.ru),  
Е.В. ШМЫГЛИНА, магистрант

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

## Формирование природного каркаса при реорганизации промышленных зон Ростова-на-Дону

*Существующее положение в крупнейших городах вызывает беспокойство жителей и диктует необходимость разработки новых системных градостроительных подходов, направленных на создание комфортной и безопасной среды обитания и сохранения природно-рекреационного каркаса города (далее – ПРК). Отсутствие регламентов по использованию территорий, расположенных в окружении ПРК, повышение плотности застройки приводят к росту рекреационной нагрузки. В связи с тем, что рассматриваемый объект выполняет функции рекреационного значения, в работе обоснована необходимость формирования ПРК с учетом реорганизации промышленных зон. Поставленная задача имеет научную и практическую значимость, направленную на повышение качества градостроительного планирования, улучшение состояния природных условий, обеспечение устойчивого территориального развития города в целом.*

**Ключевые слова:** антропогенное воздействие, природный каркас, реорганизация промышленных зон, рекреационная нагрузка, территориальное планирование, функциональное зонирование.

**Для цитирования:** Слепнев М.А., Шмыглина Е.В. Формирование природного каркаса при реорганизации промышленных зон Ростова-на-Дону // *Жилищное строительство*. 2023. № 12. С. 46–50.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-46-50>

M.A. SLEPNEV, Candidate of Sciences (Engineering), Docent (SlepnevMA@mgsu.ru),  
E.V. SHMYGLINA, Masters Student

National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

### Formation of the Natural Framework During the Reorganization of Industrial Zones in Rostov-Na-Don

The current situation in the largest cities causes concern among residents and dictates the need to develop new systematic urban planning approaches aimed at creating a comfortable and safe living environment and preserving the natural and recreational framework of the city (hereinafter referred to as the NRF). The absence of regulations on the use of territories located in the vicinity of the NRF, an increase in the density of development leads to an increase in recreational load. Due to the fact that the object in question performs the functions of recreational value, the article substantiates the need for the formation of a NRF taking into account the reorganization of industrial zones. The task set has scientific and practical significance, aimed at improving the quality of urban planning, improving the state of natural conditions, ensuring sustainable territorial development of the city as a whole.

**Keywords:** anthropogenic impact, natural framework, reclamation of industrial zones, recreational load, territorial planning, functional zoning.

**For citation:** Slepnev M.A., Shmygliina E.V. Formation of the natural framework during the reorganization of industrial zones in Rostov-Na-Don. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2023. No. 12, pp. 46–50. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-46-50>

Проведен анализ ПРК г. Ростов-на-Дону, разработка проектного предложения по формированию озелененной территории с учетом реорганизации производственных зон. Формирование единого природного каркаса на данный момент является одной из проблем крупнейших исторически сложившихся городов [1–5]. Авторами предложен подход, направленный на формирование и обеспечение связанности ПРК, определяющий использование линейных и полигональных объектов города, таких как улично-дорожная сеть, сеть водных объектов и промышленных зон.

Расчет рекреационной нагрузки учитывал принцип лимитирующего фактора. Главным экологическим фактором, лимитирующим допустимое количество посетителей, принято сохранение самого неустойчивого компонента ландшафта – животного и растительного мира [6, 7]. Величина рекреационной нагрузки зависит от факторов, обусловленных не только антропогенным воздействием, но и социальными показателями, такими как состав жилых групп и их поведение на маршруте рекреационного воздействия [8, 9]. Прослеживается тенденция к разрушению ПРК города в результате антропогенного воздействия. Цель –

обоснование проектных решений по обеспечению связанности ПРК. Объектом исследования определены рекреационные, а также озелененные территории г. Ростов-на-Дону. Работа направлена на анализ ПРК Ростова-на-Дону, определение концентрации производственных территорий в общем балансе города, разработку варианта по использованию промышленных функциональных зон в качестве озелененных пространств при их реорганизации.

### Материалы и методы

Ростов-на-Дону является самым компактным миллионником, что может свидетельствовать о плотной застройке, особенно в центральной (исторической) части города. Это крупный административный, экономический, культурный, научно-образовательный, промышленный центр и важнейший транспортный узел Юга России. Площадь озеленения с учетом зоны рекреационного назначения, озелененных территорий специального назначения, режимных территорий,

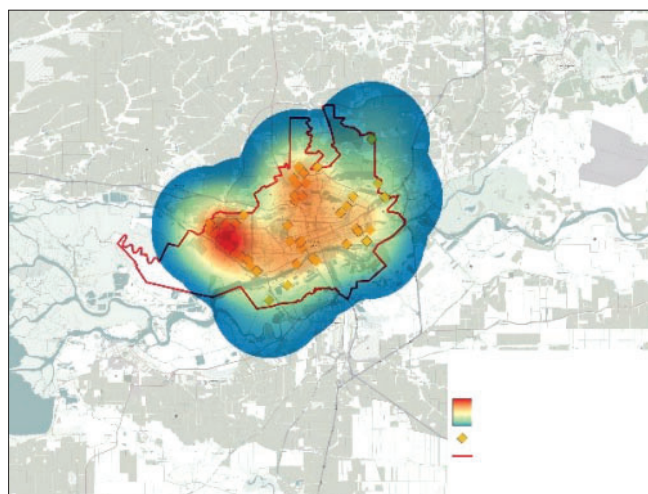


Рис. 1. Концентрация производственных территорий  
Fig. 1. Concentration of production areas

Таблица 1  
Table 1  
Суммарная площадь озелененных территорий  
в Кировском районе  
The total area of green areas in the Kirovsky district

Категория объекта	Площадь территории, га	Норматив, м <sup>2</sup> /чел.	Значение, га
Общегородские объекты озеленения (набережная, бульвары)	57,92	10	65
Районные объекты озеленения (парки, скверы, сады)	23,46	6	39
Лесопарковые территории	363	5	32,5

прочих озелененных территорий менее 10 тыс. га, показатель озеленения составляет 29%.

После анализа схемы территориального планирования, существующих градостроительных регламентов проанализированы различные картографические материалы, находящиеся в открытом доступе [10, 11]. Проанализированы территории

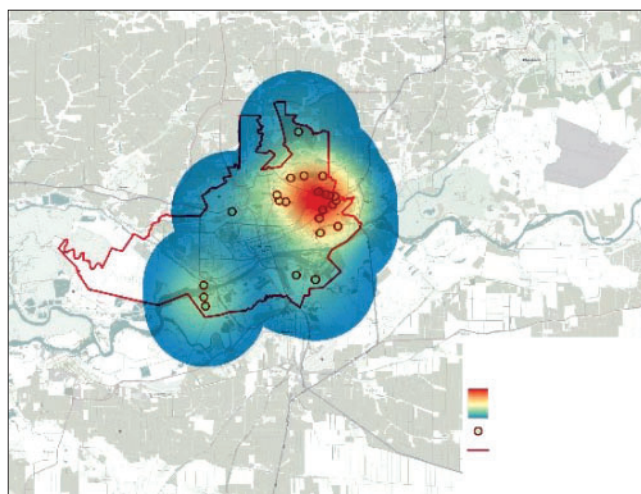


Рис. 2. Концентрация городских лесов и лесопарков в Ростове-на-Дону  
Fig. 2. Concentration of urban forests and forest parks in Rostov-on-Don

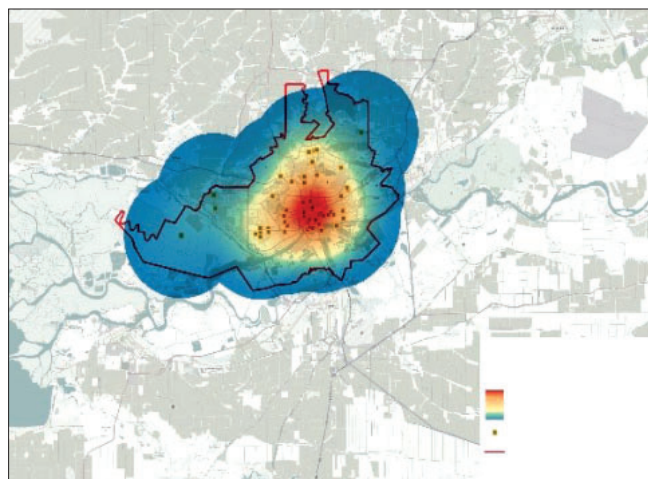


Рис. 3. ПРК г. Ростов-на-Дону  
Fig. 3. The displaying the concentration of PRK

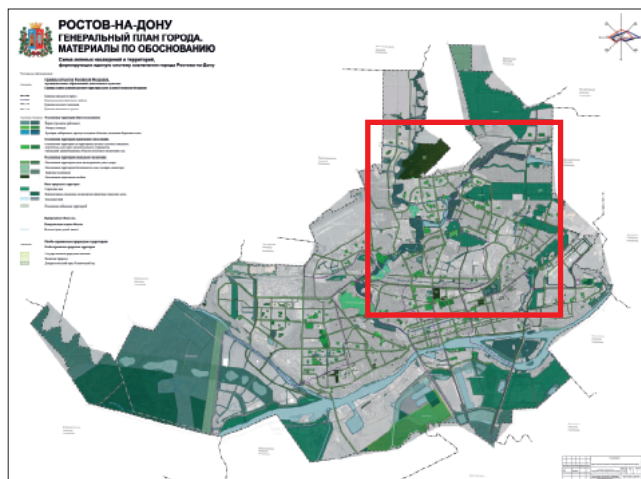


Рис. 4. Структура природно-рекреационного каркаса  
Fig. 4. The integral structure of the natural framework

Таблица 2  
Table 2

**Озеленение Кировского района**  
**Availability of landscaping in the Kirovsky district**

Виды объектов	Наличие озеленения	Отсутствие озеленения
<b>Линейное озеленение</b>		
Бульвары	2 бульвара: ул. Пушкинская, пер. Университетский	–
Озеленение улично-дорожной сети	Пр-т Михаила Нагибина, Красноармейская, Театральный, Береговая, Богатынский спуск, Большая Садовая, Малюгиной	Ворошиловский пр-т, ул. М. Горького, ул. Соколова, ул. Кировского, ул. Седова
Набережные	2 набережные: Правый берег Парк Левобережный	–
<b>Полигональное озеленение</b>		
Городские парки	–	–
Районные парки	1 парк: Парк 1 Мая	–
Скверы	4 сквера: Покровский сквер, Площадь Советов, сквер 1-й Конной Армии, сквер Лермонтова	–
<b>Укрупненный природоохранный сектор</b>		
Лесопарковая зона	1 Городской лес на левобережной территории в границах Кировского района площадью 363 Га	–

природно-антропогенных территориальных комплексов (далее – ПАТК), таких как: парки, лесопарки, городские леса, рощи, сады. Выявлено, что самая большая концентрация ПАТК в центральной и восточной части города, по окраинам города и в западной части их почти нет. Это обусловлено тем, что центральная часть города – исторически сложившийся центр с плотной застройкой, спроектированный в соответствии с нормативными требованиями. Но с учетом того, что центральный район вырастает в масштабах, происходит увеличение пятна застройки [12]. Плотность населения, площадь озелененных территорий не соответствует нормативному значению, параметр которого зависит от экологической емкости [13]. Баланс озелененных территорий приведен в табл. 1.

В табл. 2 представлены основные территориальные единицы озелененных территорий на примере центрального района.

На рис. 1 видно, что в центральной части города на границах промышленных зон сформированы жилые объекты, а на территориях рекреационного значения (рис. 2) территории ПАТК отсутствуют.

В Ростове-на-Дону также имеются территории городских парковых зон (рис. 3). Баланс территории и их концентрация отображены на рис. 4.

Видно, что большая концентрация городских лесопарковых территорий находится в северо-восточной части города. Анализ схемы функционального

Таблица 3  
Table 3

**Основные промышленные зоны г. Ростов-на Дону**  
**Main industrial zones of Rostov-on-Don**

Наименование объекта	Площадь, га
Территория старого аэропорта	367
Завод «Лазертех»	42,08
Завод «Стройнефтемаш»	31,8
Завод «Техноколь»	9,45
Автомастерские	15,7
Завод «Автоматик»	21,27
Ростовская ТЭЦ им. Ленина	19,59
Завод по производству шлакоблока	24,2
Автосервисная зона	248
«Меринос»	20,76
Мусорная площадка	171
Машиностроительный завод	75,76
Кирпичный завод	28,87
Завод «Пролетарский молот»	12,1
Локомотивное депо	21,15
Электровозоремонтный завод	8,89
Автобаза	34,5
Строительные организации	67,2
Юг-Руси	1006
Донской порт	80,8
Ростовский порт	36,98
Логистическая компания	92,59
Водонапорная башня	21,47
Ростсельмаш	153
Роствертол	327
Завод «Электроаппарат»	32,78

Таблица 4  
Table 4

**Количественные показатели озеленения ПАТК**  
**г. Ростов-на-Дону**  
**Quantitative indicators of landscaping**  
**of the Rostov-on-Don Agricultural Complex**

Классификация	Количество	Площадь, га
Парки	26	385,93
Сады	10	1121,73
Городские леса, лесопарковые территории	3	719
ООПТ	2	727,54

зонирования города позволил выявить, что именно в этой части населенного пункта сконцентрировано большее количество промышленных зон, которые, в свою очередь, при реорганизации могут выполнить функцию связанности ПРК. В табл. 3 представлены наиболее крупные производственные зоны с указанием их площадей.

При проведении натурного обследования было выявлено, что границы территорий промышленных

**Таблица 5**  
**Table 5**  
**Обеспеченность рекреационными ресурсами**  
**Provision of recreational resources**

Классификатор	Наименование	Обеспеченность	%
P	Общегородской центр в сложившейся застройке	1	100
P1	В новой застройке	Не менее 0,4	35–45
P1.1	Жилые районы на свободных территориях	Не менее 0,6	50–60
P1.2	В условиях реконструкции	Не менее 0,1	45–55
P1.3	Микрорайоны (жилые группы)	Не менее 0,7	50–55
P1.4	Коммунально-складские зоны (промышленные)	Не менее 0,3	15–25

зон не всегда совпадают с действительными, а режим использования не соответствует предусмотренному нормативно-правовыми актами. В табл. 4 приведена основная классификация и количественные показатели ПРК.

На основе проведенного исследования авторами были разработаны рекомендации учета следующего значения процентного соотношения по озеленению

#### Список литературы

1. Медведков А.А., Никанорова А.Д., Шабалина Н.В. Функциональное зонирование города Кировска (Мурманская область) в условиях туристско-рекреационного освоения его территории // *ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф.* 2019. Т. 25. Ч. 2. С. 429–436. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-429-436
2. Слепнев М.А., Мельникова Е.В. Оценка рекреационной нагрузки ПКИОИ «Парк Зарядье» // *Экология урбанизированных территорий.* 2019. № 4. С. 105–112.
3. Филиппов В.Н., Кисельникова Д.Ю. Предельные параметры застройки жилых зон. К вопросу о совершенствовании ПЗЗ Новосибирска // *Жилищное строительство.* 2018. № 11. С. 29–32.
4. Milad Dehghani Pour, Ali Akbar Barati Hossein Azadi, Jürgen Scheffran, Mehdi Shirkhani. Analyzing forest residents' perception and knowledge of forest ecosystem services to guide forest management and biodiversity conservation // *Forest Policy and Economics.* 2023. Vol. 146. 102866. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2022.102866>
5. Гордон В.А., Бакаева Н.В., Черняева И.В. Исследование факторов демографического прироста населения региона // *Научный журнал строительства и архитектуры.* 2023. № 1 (69). С. 123–134. DOI: 10.36622/VSTU.2023.69.1.010

основных рекреационных функциональных зон городских поселений, представленные в табл. 5.

Дальнейшая работа будет направлена на определение и расчет озелененной территории промышленных зон г. Ростов-на-Дону, будет предложен вариант реорганизации производственной зоны, разработана часть схемы ПРК города, направленная на сохранение благоприятного функционирования, а также формирование устойчивого развития территории города в целом.

#### Заключение и обсуждение

На сегодняшний день ПРК г. Ростов-на-Дону не сформирован. Наблюдается отсутствие связей, разрывы, особенно в западной части города. В связи с увеличением численности населения, строительства новых территориальных единиц (микрорайонов) наблюдается нарушение в обеспечении и соблюдении нормативного значения по озеленению, что, в свою очередь, влияет на ухудшение качества городской среды и вызывает потребность в увеличении рекреационного потенциала.

#### References

1. Medvedkov A.A., Nikanorova A.D., Shabalina N.V. Functional zoning of Kirovsk city (Murmansk region) in the conditions of tourist and recreational development of its territory. *InterGIS. Geoinformation support of sustainable development of territories: Proceedings of Intern. conf.* 2019. Vol. 25. Part 2, pp. 429–436. (In Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-429-436
2. Slepnev M.A., Melnikova E.V. Assessment of the recreational load of the Park Zaryadye PKIOI. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy.* 2019. No. 4, pp. 105–112. (In Russian).
3. Filippov V.N., Kiselnikova D.Yu. Limit parameters of residential zones development. To the issue of improving the ZPZ of Novosibirsk. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2018. No. 11, pp. 29–32. (In Russian)
4. Milad Dehghani Pour, Ali Akbar Barati Hossein Azadi, Jürgen Scheffran, Mehdi Shirkhani. Analyzing forest residents' perception and knowledge of forest ecosystem services to guide forest management and biodiversity conservation. *Forest Policy and Economics.* 2023. Vol. 146. 102866. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2022.102866>
5. Gordon V.A., Bakaeva N.V., Chernyaeva I.V. Study of the factors of demographic growth of the population of the region. *Scientific Journal of Construction and Architecture.* 2023. No. 1 (69), pp. 123–134. DOI: 10.36622/VSTU.2023.69.1.010

6. Vanya Stoycheva, Davide Geneletti. A review of regulating ecosystem services in the context of urban planning // *Journal of the Bulgarian Geographical Society*. Vol. 48, pp. 27–42. DOI: 10.3897/jbgs.e93499
7. Bakaeva N.V., Matyushin D.V., Chernyaeva I.V. Integrated security as-sessment engineering construction object // *E3S Web of Conferences*. 2023. 371. 02043. AFE-2022. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202337102043>
8. Слепнев М.А., Филякова Е.И. Оценка рекреационной нагрузки городского парка культуры и отдыха город Орел // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2019. № 3 (27). С. 101–110.
9. Кормина А.А., Щербина Е.В. Методический подход к обоснованию функционально-планировочной организации и оценки состояния жилой среды города. *Материалы V Международной конференции «Устойчивое развитие территорий»* (17–19 мая 2023 г., г. Москва, НИУ МГСУ). С. 111–117.
10. Слепнев М.А., Попов А.В. Экологическая емкость городских природно-антропогенных территориальных комплексов // *Жилищное строительство*. 2019. № 3. С. 57–60.
11. Бакаева Н.В., Гордон В.А., Черняева И.В. Прогнозирование социально-демографических характеристик в городском проектировании // *Градостроительство и архитектура*. 2023. Т. 13. № 3. С. 151–162. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.03.19
12. Слепнев М.А., Бакаева Н.В. Проектное функциональное зонирование рекреационных территорий // *Жилищное строительство*. 2020. № 1–2. С. 31–38. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2020-1-2-31-37>
13. Слепнев М.А., Рязанцева А.А. Обеспечение устойчивого развития парка-усадыбы «Останкино» г. Москвы // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. № 9. С. 1115–1123.
6. Vanya Stoycheva, Davide Geneletti. A review of regulating ecosystem services in the context of urban planning. *Journal of the Bulgarian Geographical Society*. Vol. 48, pp. 27–42. DOI: 10.3897/jbgs.e93499
7. Bakaeva N.V., Matyushin D.V., Chernyaeva I.V. Integrated security as-sessment engineering construction object. *E3S Web of Conferences*. 2023. 371. 02043. AFE-2022. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202337102043>
8. Slepnev M.A., Filiakova E.I. Assessment of the recreational load of the urban park of culture and recreation Orel city. *Biosfernaya sovvestimost': chelovek, region, tekhnologii*. 2019. No. 3 (27), pp. 101–110. (In Russian).
9. Kormina A.A., Shcherbina E.V. Methodical approach to justification of functional-planning organization and assessment of the residential environment of the city. *V International Conference "Sustainable Development of Territories"*. May 17–19. 2023, Moscow. pp. 111–117.
10. Slepnev, M.A., Popov A.V. Ecological capacity of urban natural-anthropogenic territorial complexes. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2019. No. 3, pp. 57–60. (In Russian).
11. Bakaeva N.V., Gordon V.A., Chernyaeva I.V. Forecasting of socio-demographic characteristics in urban design. *Gradostroitel'stvo i arkhitektura*. 2023. Vol. 13. No. 3, pp. 151–162. (In Russian). DOI: 10.17673/Vestnik.2023.03.19
12. Slepnev M.A., Bakaeva N.V. Project functional zoning of recreational territories. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2020. No. 1–2, pp. 31–38. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2020-1-2-31-37>
13. Slepnev M.A., Ryazantseva A.A. Ensuring the sustainable development of the «Ostankino» in Moscow. *Vestnik MSUCE*. 2021. Vol. 16. No. 9, pp. 1115–1123. (In Russian).

## СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА



### Учебное пособие «Промышленное и гражданское строительство. Введение в профессию»

Авторы: Грызлов В.С., Ворожбянов В.Н., Гендлина Ю.Б., Залипаева О.А., Каптюшина А.Г.,  
Медведева Н.В., Петровская А.А., Поварова О.А., Чорная Т.Н.  
Научный редактор – д-р техн. наук, проф. В.С. Грызлов  
Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 276 с.

Дана общая характеристика профессии строитель. Приведены сведения из истории развития строительной отрасли. Предложено краткое описание видов строительной продукции, особенностей проектирования строительных объектов, технологии и порядка организации возведения зданий и сооружений; раскрыты вопросы менеджмента в строительстве. Подчеркнута важность строительной науки и цифровизации строительной деятельности. Отдельная глава посвящена особенностям организации инженерно-строительного обучения. Для студентов бакалавриата, начавших обучение по направлению «Строительство». Может быть использовано для профориентационной работы с выпускниками школ.

По вопросам приобретения обращайтесь в издательство «Инфра-Инженерия»

УДК 691.175

DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-51-57>

А.И. ВАЛИЕВ, инженер, аспирант (tatcomposite@mail.ru),  
А.М. СУЛЕЙМАНОВ, д-р техн. наук (alfred-sulejmanov@yandex.ru)

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1)

## Гибридные полимерные композиты конструкционного назначения

*Произведен обзор зарубежной и отечественной литературы, практики по использованию в области строительства полимерных композитов конструкционного назначения. Выявлены основные факторы, сдерживающие широкое внедрение полимерных композитов в строительной сфере: изготавливаемые на производствах полимеркомпозитные профили дублируют формы профилей металлических аналогов с изотропными механическими свойствами; не для всех элементов конструкций из полимерных композитов, выполняется определяющее условие проверки на прочность согласно второму предельному состоянию (по деформациям), что приводит к увеличению поперечных сечений, уменьшению шага конструктивных элементов; проблемы, связанные с недостаточной информацией о долговечности, предполагающей применение завышенных значений коэффициентов условий работы материала ввиду недостаточной изученности свойств и значительного разброса физико-механических характеристик; проблемы, связанные с импортозамещением компонентов полимерного композита. Сформулирована научная проблема, которая заключается в исследовании механизмов формирования адгезионной прочности гибридных композитов на межфазной границе «волокно–матрица» с последующей разработкой эффективных способов регулирования их состояния с целью обеспечения прочного соединения. Приведены актуальные задачи, на решении которых необходимо сконцентрироваться для ускорения процесса внедрения гибридных полимерных композитов конструкционного назначения.*

**Ключевые слова:** полимер, композиционный материал, стеклопластик, углепластик, гибриды.

**Для цитирования:** Валиев А.И., Сулейманов А.М. Гибридные полимерные композиты конструкционного назначения // *Жилищное строительство*. 2023. № 12. С. 51–57. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-51-57>

A.I. VALIEV, Engineer (tatcomposite@mail.ru),

A.M. SULEIMANOV, Doctor of Sciences (Engineering) (alfred-sulejmanov@yandex.ru)

Kazan State University of Architecture and Engineering (1, Zelenaya Street, Kazan, 420043, Republic of Tatarstan, Russian Federation)

### Hybrid Polymer Composites for Structural Purposes

A review of foreign and domestic literature and practice on the use of polymer composites for structural purposes in the field of construction is carried out. The main factors hindering the widespread introduction of polymer composites in the construction sector have been identified: polymer composite profiles manufactured at the factories duplicate the shapes of profiles of metal analogues with isotropic mechanical properties; not all structural elements made of polymer composites meet the defining condition of strength testing according to the second limit state (for deformations), this leads to an increase in cross-sections, a decrease in the pitch of structural elements; problems related to insufficient information on durability, involving the use of overestimated values of the coefficients of the working conditions of the material due to insufficient knowledge of the properties and a significant spread of physical and mechanical characteristics; problems related to import substitution of polymer composite components. A scientific problem has been formulated, which consists in studying the mechanisms of formation of the adhesive strength of hybrid composites at the fiber-matrix interface, followed by the development of effective ways to regulate their condition in order to ensure a strong connection. The actual tasks, the solution of which needs to be concentrated in order to accelerate the process of introducing hybrid polymer composites for structural purposes, are presented/

**Keywords:** polymer, composite material, fiberglass, carbon fiber, hybrid.

**For citation:** Valiev A.I., Suleimanov A.M. Hybrid polymer composites for structural purposes. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2023. No. 12, pp. 51–57. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-51-57>

Создание атмосферостойких, коррозионно-устойчивых, эффективных, долговечных сооружений в строительной практике неразрывно связано с внедрением новых конструкционных материалов высокой удельной прочности и жесткости, сравнительно низ-

кими удельными затратами энергии на производство. Одним из таких материалов в сфере строительства стал полимерный композит (ПК) [1].

В ПК за прочностные характеристики отвечает наполнитель, за диссипацию напряжений – поли-

мерная матрица, а поверхность раздела фаз между наполнителем и связующим отвечает за передачу напряжений от наполнителя к матрице. За счет оптимального расположения слоев наполнителя в матрице получают прочное, жесткое при сохранении массы изделие с анизотропными механическими свойствами [2–5].

Существует большое количество методов производства ПК: намотка, формование, инфузия, укладка, пултрузия и др., применение которых определяется размерами, формами и назначением [6–8].

Среди множества производимых ПК наиболее экономичными, технологичными являются стеклопластики за счет оптимального соотношения цены и характеристик материала. Наиболее высокими показателями удельной прочности и жесткости среди широко используемых конструкционных полимерных материалов отличаются углепластики [9, 10].

Выделяют конструкционные, отделочные, конструкционно-отделочные ПК. Наиболее популярные среди них: мостовые сооружения; системы для замены стальной арматуры в железобетонных настилах; системы для замены деревянных, алюминиевых и стальных профилей, когда коррозия создает дорогостоящие проблемы с обслуживанием или небезопасные условия; системы для усиления бетона, деревянных и каменных конструкций; химически стойкие напольные покрытия; промышленные и архитектурные системы ограждений; высокопрочные решетки; шпильки, гайки и др. Производство ПК с внедрением в строительную практику осуществляется как за рубежом (компании «Strongwell Corporation», «Pultex», «Pirax» и др.), так и в России (компании «АпАТэк», «ОПОРА», «Татнефть-Пресскомпозит», «Юматекс» Госкорпорации «Росатом» и др.).

С ростом строительных объемов область применения конструкционных ПК возрастает, однако повышаются и требования к ним. Основными факторами, сдерживающими широкое внедрение в строительную практику этих перспективных материалов, являются:

1. Изготавливаемые на производстве ПК дублируют формы профилей металлических аналогов с изотропными механическими свойствами. К примеру, у пултрузионных стеклопластиковых профилей вследствие однонаправленного армирования структура ортотропна со значительной разницей механических свойств по ортогональным направлениям, что необходимо учитывать при проектировании композитных профилей и расчете строительных конструкций из них, проверке условий прочности для несущих элементов конструкций.

2. Для сооружений, выполненных из ПК (стеклопластиков) по аналогичной конструктивной схеме из

металла, не выполняется условие проверки на прочность согласно второму предельному состоянию (по деформациям, ГОСТ 27751–2014), что приводит к увеличению поперечных сечений, уменьшению шага конструктивных элементов.

3. Недостаточность информации о долговечности конструкций из ПК. В нормативной документации присутствуют завышенные значения коэффициентов условий работы материала ввиду недостаточной изученности свойств и значительного разброса физико-механических характеристик, в то же время отсутствуют инструментарии для оперативного определения этих коэффициентов.

4. Проблемы импортозамещения в промышленности композитных материалов.

Решения вышеизложенных проблем можно достичь за счет оптимизации ПК с последующей разработкой долговечных гибридных полимерных композитов (ГПК) с оптимальным содержанием слоев различных типов наполнителей в едином связующем, оптимальным взаимодействием на межфазной границе «волокно–матрица» с использованием отечественной продукции.

Целью данного исследования является обзор зарубежной и отечественной литературы, практики по использованию в области строительства полимерных композитов, в том числе гибридных, формулирование научной проблемы, актуальных задач, на которых необходимо сконцентрироваться для ускорения процесса внедрения гибридных композитов в строительную практику.

### **Практика использования гибридных полимерных композитов конструкционного назначения**

Гибридными называют композиционные материалы, содержащие более одного вида армирующего компонента в единой матрице. Включение более одного вида армирующего компонента имеет целью повышение тех или иных свойств ПК. Надлежащим образом сконструированные ГПК позволяют получать конструкции, имеющие оптимальные сбалансированные свойства, такие как прочность, жесткость и др. [11].

В области строительства наибольшую популярность с применением конструкционных ПК получили мостовые сооружения. Во всем мире реализовано уже более 360 мостов из ПК, элементы конструкций которых выполнены различными методами производства [12]. Это и цельнокомпозитный мост Miyun Bridge, построенный в 1982 г. в Китае, и пешеходный мост Aberfeldy Golf Course Bridge, построенный в 1990 г. в Великобритании, вантовый пешеходный мост, построенный в 1997 г. в Дании, г. Колдинг,

пешеходный мост Lleida Footbridge с цельнокомпо- зитным пролетным строением из стеклопластика, Испания, г. Льеда (2001 г.) и др. Среди них выделяют около 53 пешеходных мостов, выполненных полно- стью композитными, остальные же пешеходные, ав- тодорожные мосты являются либо с несущими эле- ментами конструкций из композитных с гибридными по материалу (т. е. с гетероволокнистым наполне- нием), либо гибридными по материалу конструкции (ПК-сталь/железобетон) [12–16].

Основной особенностью выполнения несущих элементов сооружения из гибридных ПК с гетеро- волокнистым наполнением и гибридных по мате- риалу конструкций является возможность обес- печения условий прочности, деформативности, устойчивости.

Гибридными по материалу конструкции в основ- ном выполняются для несущих элементов в виде главных балок больших пролетов, балок проезжей части. Первым мостом с гибридным по материалу конструкции в Европе является однопролетный мост Friedberg Bridge в Германии (рис. 1) длиной 27 м, ши- риной 5 м; его несущие элементы выполнены в виде главных стальных балок таврового сечения, поверх которых уложены плиты, выполненные из стекло- пластика [12].

При оптимальном проектировании несущих эле- ментов конструкции с гибридным гетероволокнистым армированием по материалу возможно учесть его положительные качества (устойчивость к коррозии, большая долговечность и др.) со сведением к мини- муму их недостатков.

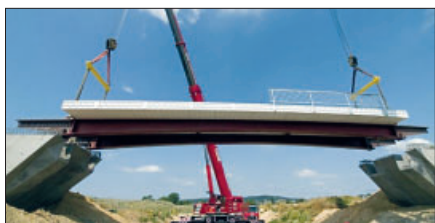
Более 5 млн посетителей ежегодно посещают На- циональный лес Дэниела Буна. В округе Бат, штат Кентукки, 60-футовый мост с прозрачным пролетом, соединяющий зону для пикника «Clear Creek Furnace» с трассой «Sheltower Trase» (рис. 2), является первым гибридным мостом из композитного двутаврового бруса, армированного гетероволокнами. Двутавро- вая балка из гибридного композитного угле-стекло-

пластика, изготовленная компанией «Strongwell Corporation» методом пултрузии, обеспечивает ос- новные несущие элементы (прочность, деформа- тивность, устойчивость). Добавление углеродного волокна к полкам двутавровой балки существенно увеличивает жесткость при изгибе [17, 18].

Мост Томс-Крик, Блэксбург, Вирджиния (рис. 3), также выполнен с использованием гибридных компо- зитов. После замены проржавевших стальных балок, поддерживающих мост, композитными балками, гру- зоподъемность моста шириной  $17\frac{1}{2} \times 22$  фута была повышена с 10 до 20 т. По мосту проезжает более тысячи автомобилей в день. Композитная балка из- готовлена пултрузией с матрицей из винилэфирной смолы, армированной углеродом/Е-стеклом. Кон- струкция балки значительно улучшает модуль упру- гости при изгибе и кручении по сравнению со стекло- пластиком. Модуль изгиба композитной балки более чем в два раза превышает модуль изгиба стандарт- ной двутавровой балки из стекловолокна. Вся рекон- струкция моста, включая асфальтирование настила, была завершена за пять дней.

Компания «Pirax» спроектировала и изготовила два пешеходных моста из полимерных композитов, армированных волокнами, в том числе гетероволок- нами; четыре площадки и три лестницы для замены металлического моста, который был разрушен по- сле сильного шторма на железнодорожной линии «Dover Sea Wall» в графстве Кент, Великобритания (рис. 4).

В отличие от большинства пешеходных мостов из ПК элементы были спроектированы как гибри- дные системы, где пултрузионные компоненты были собраны из гетероволокнистых наполнителей и ма- трицы. Каждый пролет пешеходного моста весил 9 тыс. фунтов, что примерно на треть меньше веса аналогичной металлической конструкции. По завер- шении строительства пешеходный мост имеет длину почти 102 фута, 8 футов в ширину и более 11 футов в высоту.



**Рис. 1.** Автомобильный мост Friedberg Bridge, сооружение с гибридным по матери- алу конструкции [12]

**Fig. 1.** Friedberg Bridge, a highway bridge with a hybrid material structure [12]



**Рис. 2.** Гибридный мост в округе Бат, штат Кентукки (США) с гибридным гетероволок- нистым армированием элементов конструк- ции сооружения («Strongwell Corporation»)

**Fig. 2.** Hybrid bridge in Bath County, Ken- tucky (USA), with hybrid heterofiber-nylon reinforcement of the structural elements of the con- struction («Strongwell Corporation»)



**Рис. 3.** Мост Томс-Крик, Блэксбург («Strongwell Corporation»)

**Fig. 3.** Toms Creek Bridge, Blacksburg («Strongwell Corporation»)

38-футовый мост Департамента транспорта Вирджинии (рис. 5), который перекинут через Дики-Крик на трассе 601 в Шугар-Гроув, штат Вирджиния, является первым в мире мостом, способным выдерживать полный трафик тягача с прицепом. Несущие балки моста состоят из углеродных волокон в верхнем и нижнем фланцах для повышения жесткости и волокон из стекла в остальной части балки для прочности, сопротивления кручению и экономичности. Сочетание оптимальных размеров и составов обеспечивает прочность и жесткость, необходимые для мостовых конструкций.

Мосты из ПК, в том числе с ГПК элементами, на практике по сравнению с аналогами из стальных элементов являются атмосферостойкими строительными материалами, выдержавшими большие перепады температуры, ураганные ветры, УФ-излучение и др.; аварий во время эксплуатации замечено не было [12–19].

В отечественной практике также были попытки строительства пешеходных мостовых сооружений из ПК с использованием цельнокомпозитных пролетных строений в Москве по ул. Промышленной рядом с платформой Чертаново (первый композитный мост, возведенный в 2004 г.); также был построен вантовый мост в парковой зоне г. Дубна; арочный пешеходный мост в парке 50-летия Победы; пешеходный мост через платформу Косино в Москве [20–22].

Первым в России гибридным по материалу конструкции считается автодорожный мост длиной 18,5 м через р. Пашенка, возведенный в 2014 г. компанией ООО «ОПОРА» (рис. 6). Гибридных (с гетерофазным наполнением) конструкций мостов в отечественной практике не наблюдается; развитие рынка из конструктивных ПК значительно уступает мировому, что является актуальным для внедрения в отечественное производство оптимальных вариантов сечений с последующей разработкой номенклатуры изделий, в дополнение к существующим технологическим линиям.

### Научная проблема, актуальные задачи, на решении которых необходимо сконцентрироваться для ускорения процесса внедрения ГПК конструкционного назначения

При разработке ГПК для полной реализации свойств наполнителя с равномерной диссипацией напряжений к матрице необходимо достижение высокой адгезии матрицы к поверхности гетерофазных наполнителей в межфазной области «волоконно–матрица», которая обусловлена строением, состоянием, а также свойствами поверхностей гетерофазных наполнителей, и свойствами матрицы [23, 24].

Взаимодействие между двумя конденсированными фазами приводит к возникновению физической либо химической связи. Как известно, существует несколько теорий адгезии: механическая, электрическая (электронная), адсорбционная (молекулярная), релаксационная и теория слабого слоя. Каждая из теорий разработана для объяснения основных механизмов формирования адгезионного контакта. Для большинства адгезионных соединений основной механизм адгезии описывается адсорбционной теорией [25]. Регулирование свойств межфазного взаимодействия позволяет снизить остаточные напряжения в готовом изделии, получить необходимые физико-механические свойства.

Для волокнистых ПК прочность разрушения определяется адгезионной прочностью соединения «волоконно–связующее» ( $\tau_0$ ) в элементарной ячейке композита, а адсорбция и смачивание являются важнейшими процессами, определяющими возникновение связи между наполнителем и связующим на межфазной границе [26, 27].

Адгезионное взаимодействие на границе раздела фаз в соединении матрицы и наполнителя является функцией широкого ряда факторов. Важными среди них считаются энергетические характеристики поверхности – термодинамическая работа адгезии ( $W_a$ ), свободная поверхностная энергия (СПЭ) и ее составляющие ( $\gamma_s^d, \gamma_s^-, \gamma_s^+, \gamma_s^{ab}$ ) [28].



Рис. 4. Мост на железнодорожной линии Dover Sea Wall в графстве Кент, Великобритания («Strongwell Corporation»)   
 Fig. 4. Bridge on the Dover Sea Wall rail line in Kent, UK («Strongwell Corporation»)



Рис. 5. Мост Департамента транспорта Вирджинии («Strongwell Corporation»)   
 Fig. 5. Virginia Department of Transportation Bridge («Strongwell Corporation»)

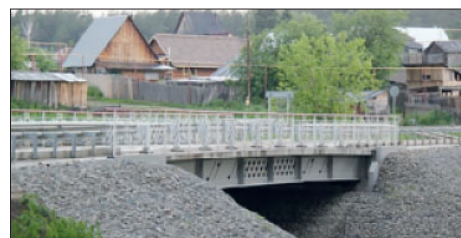


Рис. 6. Гибридный автодорожный мост длиной 18,5 м через р. Пашенка (ООО «ОПОРА»)   
 Fig. 6. Hybrid highway bridge 18.5 m long over the Pashenka River (OPORA LLC)

Исследование механизмов формирования адгезионной прочности ГПК на межфазной границе «волокно–матрица» с последующей разработкой эффективных способов регулирования их состояния в целях обеспечения прочного соединения при разработке ГПК является актуальной научной проблемой.

Для решения научной проблемы, т. е. обеспечения прочного взаимодействия между компонентами гибридного ПК, необходимо выполнение следующих актуальных задач, на решения которых рекомендуется сконцентрироваться для ускорения процесса внедрения ГПК конструкционного назначения:

1. Матрица должна обеспечивать хорошую смачиваемость всей поверхности распределенного в ней гетероволоконного наполнителя с рекомендуемым равным диаметром волокон, максимально реализуя свойства ПК, т. е. взаимодействие на межфазной границе «гетероволоконные наполнители – матрица» должно быть оптимальным.

2. Слои гибридного ПК должны быть с необходимым содержанием волокон различной природы (с минимальной по содержанию поверхностной плотности углеродного волокна), деформироваться совместно и линейно со структурой, симметричной относительно срединной плоскости поперечного сечения.

3. В структуре готового изделия из гетероволоконного ПК должны отсутствовать дефекты и поры.

4. При создании гибридных ПК рекомендуется учитывать различия коэффициентов линейного расширения (КЛТР), подбирая наиболее близкие значе-

ния данного показателя (даже внутри одного класса волокнистых наполнителей наблюдаются различные КЛТР).

5. Следует разработать оптимальный подбор схемы армирования, метода производства с оптимальными материалами оснасток, технологии переработки.

6. Необходим численный инструментарий для приближенного расчета физико-механических характеристик с последующей верификацией расчетной модели. Следует отметить, что расчет физико-механических характеристик с применением правила смесей для гибридных ПК не всегда представляется возможным в силу различных свойств образованных межфазных слоев на границе «волокно–матрица».

7. Необходим численный инструментарий для прогнозирования упругопрочностных характеристик, оптимального взаимодействия на межфазной границе, а также долговечности гибридного ПК.

Все вышеперечисленное требуется в первую очередь для снижения остаточных напряжений в готовом изделии, который, в свою очередь, может привести к ухудшению упругопрочностных характеристик, изменению формы готового изделия.

Таким образом, новым направлением в сфере строительства из ПК является разработка несущих гибридных ПК с улучшенными физико-механическими характеристиками, с оптимальным подбором волокнистых наполнителей и матрицы, взаимодействием на межфазной границе «волокно–матрица» и сведением к минимуму их недостатков.

## Список литературы

1. Сапунов В.Т. Прочность, надежность и долговечность композитов как конструкционных материалов // *Композиты и наноструктуры*. 2016. Т. 8. № 2 (30). С. 110–119.
2. Mercier C., Khelil A., Al Mahmoud F., Blin-Lacroix J.L., Pamies A. Experimental investigations of buckling behaviour of steel scaffolds. *Structures*. 2021. Vol. 33, pp. 433–450. DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2021.04.045.
3. Kayumov R. A., Shakirzyanov F. R. Large deflections and stability of low-angle arches and panels during creep flow. *Advanced Structured Materials*. 2021. Vol. 141, pp. 237–248. DOI: 10.1007/978-3-030-54928-2\_18.
4. Zheng Y., Guo Z. Investigation of joint behavior of disk-lock and cuplok steel tubular scaffold. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021. Vol. 177. DOI: 10.1016/J.JCSR.2020.106415.
5. 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*.

## References

1. Sapunov V.T. Strength, reliability and durability of composites as structural materials. *Kompozity i nanostruktury*. 2016. Vol. 8. No. 2. Iss. 30, pp. 110–119. (In Russian).
2. Mercier C., Khelil A., Al Mahmoud F., Blin-Lacroix J.L., Pamies A. Experimental investigations of buckling behaviour of steel scaffolds. *Structures*. 2021. Vol. 33, pp. 433–450. DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2021.04.045.
3. Kayumov R.A., Shakirzyanov F.R. Large deflections and stability of low-angle arches and panels during creep flow. *Advanced Structured Materials*. 2021. Vol. 141, pp. 237–248. DOI: 10.1007/978-3-030-54928-2\_18.
4. Zheng Y., Guo Z. Investigation of joint behavior of disk-lock and cuplok steel tubular scaffold. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021. Vol. 177. DOI: 10.1016/J.JCSR.2020.106415.
5. 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 Re-*

2017. Vol. 137, pp. 135–151. DOI: 10.1016/J.JCSR.2017.06.004.
6. Донецкий К.И., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор). Ч. 1 // *Труды ВИАМ*. 2022. № 6 (112). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67.
  7. Хрульков А.В., Донецкий К.И., Усачева М.Н., Горянский А.Н. Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор). Ч. 2 // *Труды ВИАМ*. 2022. № 7 (113). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-50-62.
  8. Кузнецов И.Л., Салахутдинов М.А., Арипов Д.Н., Фахрутдинов А.Э. Разработка и экспериментальные исследования конструкций навеса над трибунами из пултрузионных стеклопластиковых профилей // *Известия вузов. Строительство*. 2019. № 3. С. 96–108.
  9. Сулейманов А.М., Шакиров А.Р., Аглиуллина А.Ф., Старовойтова И.А. Исследование кратковременной и длительной прочности адгезионных клеевых соединений для устройства систем внешнего армирования строительных конструкций // *Известия КГАСУ*. 2018. № 4 (46). С. 309–318.
  10. Салахутдинов М.А., Каюмов Р.А., Арипов Д.Н., Ханеков А.Р. Численное исследование несущей способности балки составного двутаврового сечения из пултрузионных стеклопластиковых профилей // *Известия КГАСУ*. 2022. № 2 (60). С. 15–23. DOI: 10.52409/20731523\_2022\_2\_15 EDN: BHRXOY.
  11. Скудра А.М., Булавс Ф.Я. Структурная теория армированных пластиков. Рига: Зинатне, 1978. 192 с.
  12. Potyrała P.B. Use of fibre-reinforced polymers in bridge construction. State of the art in hybrid and all-composite structures. 2011. 91 p. <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/12353> (дата обращения 18.10.2023).
  13. Keller T. Use of fibre reinforced polymers in bridge construction. SED 7. – Zurich: IABSE, 2003. 131 p.
  14. Shenoj R.A., Moy S.J., Hollaway L.C. Advanced polymer composites for structural applications in construction. Southampton: Southampton University. 2002. <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/apcfsaic.31227.0001> (дата обращения 18.10.2023).
  15. Lightweight thermoset composites. Materials in use, their processing and applications / Edited by Peter Dufton. – Shrewsbury: Rapratechnology limited, 2000. 212 p.
  16. The international handbook of FRP composites in civil engineering / Edited by Manoochehr Zoghi. – CRC Press, 2013. 706 p.
  17. Hayes M.D., Lesko J.J., Haramis J., Cousins T.E., Gomez J., Massarelli P. Laboratory and field testing of composite bridge superstructure. ASCE. *Journal search*. 2017. Vol. 137, pp. 135–151. DOI: 10.1016/J.JCSR.2017.06.004
  6. Donetskii K.I., Usacheva M.N., Khrul'kov A.V. Infusion methods for the manufacture of polymer composite materials (review). Part 1. *Trudy VIAM*. 2022. No. 6. Iss. 112, pp. 58–67. (In Russian). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67
  7. Khrul'kov A.V., Donetskii K.I., Usacheva M.N., Goryanskii A.N. Infusion methods for the manufacture of polymer composite materials (review). Part 2. *Trudy VIAM*. 2022. No. 7. Iss. 113, pp. 50–62. (In Russian). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-50-62
  8. Kuznetsov I.L., Salakhutdinov M.A., Aripov D.N., Fakhrutdinov A.E. Development and experimental studies of canopy structures over the stands from pultrusion fiberglass profiles. *Izvestiya of higher educational institutions. Construction*. 2019. No. 3, pp. 96–108. (In Russian).
  9. Suleimanov A.M., Shakirov A.R., Agliullina A.F., Starovoitova I.A. Investigation of short-term and long-term strength of adhesive adhesive joints for external reinforcement systems of building structures. *Izvestiya of the KSACU*. 2018. No. 4. Iss. 46, pp. 309–318. (In Russian).
  10. Salakhutdinov M.A., Kayumov R.A., Aripov D.N., Khanekov A.R. Numerical study of the bearing capacity of a composite I-shaped section beam of pultruded fiberglass profiles. *Izvestiya of the KSACU*. 2022. No. 2. Iss. 60, pp. 15–23. (In Russian). DOI: 10.52409/20731523\_2022\_2\_15 EDN: BHRXOY
  11. Skudra A.M., Bulavs F.Ya. *Strukturnaya teoriya armirovannykh plastikov* [Structural theory of reinforced plastics]. Riga: Zinatne. 1978. 192 p.
  12. Potyrała P.B. Use of fibre-reinforced polymers in bridge construction. State of the art in hybrid and all-composite structures. 2011. <http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/12353> (Date of access 18.10.2023).
  13. Keller T. Use of fibre reinforced polymers in bridge construction. SED 7. – Zurich: IABSE, 2003. 131 p.
  14. Shenoj R.A., Moy S.J., Hollaway L.C. Advanced polymer composites for structural applications in construction. Southampton: Southampton University. 2002. <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/apcfsaic.31227.0001> (Date of access 18.10.2023).
  15. Lightweight thermoset composites. Materials in use, their processing and applications / Edited by Peter Dufton. Shrewsbury: Rapratechnology limited. 2000. 212 p.
  16. The international handbook of FRP composites in civil engineering / Edited by Manoochehr Zoghi. – CRC Press, 2013. 706 p.
  17. Hayes M.D., Lesko J.J., Haramis J., Cousins T.E., Gomez J., Massarelli P. Laboratory and field testing of composite bridge superstructure. ASCE. *Journal*

17. Hayes M.D., Lesko J.J., Haramis J., Cousins T.E., Gomez J., Massarelli P. Laboratory and field testing of composite bridge superstructure. *ASCE. Journal of Composites for Construction*. 2000. Vol. 4. No. 3, pp. 120–128.
18. Hayes M.D., Lesko J.J., Cousins T., Waldron C., Witcher D., Barefoot G., Gomez J. Design of a short span bridge using FRP girders. *Composites in Construction International Conference*, October 10–12, 2001, Porto, Portugal.
19. Озеров С.Н., Панков А.В. Выбор конструктивно-силовой схемы пешеходного моста и сортамента профилей // *Внедрение опыта прикладных перспективных технологий авиастроения в промышленности и на транспорте*. М., 2004. Вып. 3. С. 42–48.
20. Ушаков А.Е., Кленин Ю.Г., Сорина Т.Г., Хайретдинов А.Х., Сафонов А.А. Мостовые конструкции из композитов // *Композиты и наноструктуры*. 2009. № 3. С. 25–37.
21. Кленин Ю.Г., Озеров С.Н., Семёнов В.Т., Ушаков А.Е., Хайретдинов А.Х. Мостовые конструкции из стеклопластика. *Внедрение опыта прикладных перспективных технологий авиастроения в промышленности и на транспорте: Сб. статей*. М.: Изд-во ЦАГИ, 2001. Вып. 1. С. 135–140.
22. Иванов А.Н. Перспективы применения болтофрикционных соединений элементов из полимерных фиброармированных композитов // *Известия вузов. Строительство*. 2013. № 10. С. 104–109.
23. Hughes J.D.H. The carbon fibre/epoxy interface – a review. *Composites Science and Technology*. 1991. Vol. 41, pp. 13–45.
24. Kim J.-K., Mai Y.-W. Engineered interfaces in fiber reinforced composites. Oxford: Elsevier, 1998. 486 p.
25. Nguyen D.A., Starostina I.A., Stoyanov O.V. Evaluation of the surface free energy of disperse additives for polymeric compositions under selective wetting conditions // *Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials*. 2015. Vol. 8, No. 4, pp. 280–286.
26. Крамарев Д.В., Осипчик В.С., Чалая Н.М., Березина А.Б., Колесников А.В. Изучение межфазных явлений на границе волокно – связующее в имидоорганопластиках // *Пластические массы*. 2017. № 7–8. С. 3–6.
27. Лизунов Д.А., Осипчик В.С., Олихова Ю.В., Кравченко Т.П. Влияние эпоксиноволачного олигомера на свойства эпоксифенольного связующего и углепластиков на его основе // *Пластические массы*. 2013. № 9. С. 39–42.
28. Старостина И.А., Стоянов О.В. Развитие методов оценки поверхностных кислотно-основных свойств полимерных материалов // *Вестник Казанского технологического университета*. 2010. № 4. С. 58–68.
29. Hayes M.D., Lesko J.J., Cousins T., Waldron C., Witcher D., Barefoot G., Gomez J. Design of a short span bridge using FRP girders. *Composites in Construction International Conference*, October 10–12, 2001, Porto, Portugal.
30. Ozerov S.N., Pankov A.V. Selection of pedestrian bridge structural-strength scheme and profile assortment. *Introduction of the experience of applied advanced aircraft engineering technologies in industry and transportation*. Moscow. 2004. Iss. 3, pp. 42–48. (In Russian).
31. Ushakov A.E., Klenin Yu.G., Sorina T.G., Khairtdinov A.Kh., Safonov A.A. Bridge structures made of composites. *Kompozity i Nanostruktury*. 2009. No. 3, pp. 25–37. (In Russian).
32. Klenin Yu.G., Ozerov S.N., Semenov V.T., Ushakov A.E., Khairtdinov A.Kh. Bridge structures made of fiberglass. *Introduction of the experience of applied advanced aircraft engineering technologies in industry and transportation*. Moscow: Publishing House TsAGI. 2001. Iss. 1, pp. 135–140. (In Russian).
33. Ivanov A.N. Prospects of application of bolt-friction joints of elements made of polymer fiber-reinforced composites. *Izvestiya of higher educational institutions. Construction*. 2013. No. 10, pp. 104–109. (In Russian).
34. Hughes J.D.H. The carbon fibre/epoxy interface – a review. *Composites Science and Technology*. 1991. Vol. 41, pp. 13–45.
35. Kim J.-K., Mai Y.-W. Engineered interfaces in fiber reinforced composites. Oxford: Elsevier, 1998. 486 p.
36. Nguyen D.A., Starostina I.A., Stoyanov O.V. Evaluation of the surface free energy of disperse additives for polymeric compositions under selective wetting conditions. *Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials*. 2015. Vol. 8, No. 4, pp. 280–286.
37. Kramarev D.V., Osipchik V.S., Chalaya N.M., Berzina A.B., Kolesnikov A.V. Study of interfacial phenomena at the fiber-binder interface in imidoorganoplastics. *Plasticheskie massy*. 2017. No. 7–8, pp. 3–6. (In Russian).
38. Lizunov D.A., Osipchik V.S., Olikhova Yu.V., Kravchenko T.P. Influence of epoxy oligomer on the properties of epoxyphenolic binder and carbon fiber reinforced plastics based on it. *Plasticheskie massy*. 2013. No. 9, pp. 39–42. (In Russian).
39. Starostina I.A., Stoyanov O.V. Development of methods for evaluation of surface acid-base properties of polymeric materials. *Vestnik of the Kazan Technological University*. 2010. No. 4, pp. 58–68. (In Russian).

УДК 624.011.17

DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-58-65>

А.А. КЛЮКИН, старший преподаватель (KlyukinAA@mgsu.ru)

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

## Экспериментальные исследования сжато-изгибаемых элементов составного сечения на ввинченных стержнях

Проведен анализ научных работ отечественных ученых в области использования металлических стержней в деревянных конструкциях. Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований сборного элемента конструкции из цельной древесины – брусьев сечением 150×150 мм, соединяемых винтами по высоте в стержень прямолинейного или ломаного сечения высотой 450 мм. Эти брусья могут затем укрупняться и использоваться в качестве ребер плоских или пространственных конструкций для покрытий зданий различного назначения. Конструкции не требуют высоких технологий обработки материалов и склеивания, допускают изготовление даже в построечных условиях, что целесообразно для строительства в районах освоения территорий, например в условиях Крайнего Севера. Описаны методики проведения испытаний составных конструкций на наклонных ввинченных стержнях при кратковременных нагрузках. Изучены особенности их строения и поведения при статических нагрузках в предельных состояниях. Описан характер разрушения образцов. Выявлены слабые места проектируемой конструкции. Подтверждена гипотеза о возможности применения предлагаемых конструкций как для временных зданий, так и для возведения капитальных зданий. Сделаны выводы по дальнейшему изучению данного вида конструкций.

**Ключевые слова:** деревянные конструкции, ввинченные стержни, силовая рама, балки составного сечения, деформации сдвига, нелинейные деформации, экспериментальные образцы.

Работа выполнена при поддержке гранта НИУ МГСУ. Приказ 453/130 от 15.05.2023 «О реализации проектов, поддержанных по результатам конкурса 2023 года на проведение фундаментальных и прикладных научных исследований (НИР) научными коллективами НИУ МГСУ».

**Для цитирования:** Ключкин А.А. Экспериментальные исследования сжато-изгибаемых элементов составного сечения на ввинченных стержнях // *Жилищное строительство*. 2023. № 12. С. 58–65.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-58-65>

A.A. KLYUKIN, Senior lecturer (KlyukinAA@mgsu.ru)

National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

### Experimental Studies of Compressed-Bendable Elements of Composite Cross-Section on Screwed-in Rods

An analysis of scientific works of domestic scientists in the field of the use of metal rods in wooden structures was carried out. The results of experimental and theoretical studies of a prefabricated structural element made of solid wood – beams with a cross-section of 150×150 mm connected by screws in height to a rod of rectilinear or broken section with a height of 450 mm are presented. These beams can then be enlarged and used as edges of flat or spatial structures for covering buildings for various purposes. The structures do not require high technologies for processing materials and gluing; they can be manufactured even under construction conditions, which is advisable for construction in areas of development, for example, in the Far North. Methods for testing composite structures on inclined screwed-in rods under short-term loads are described. The features of their structure and behavior under static loads in limit states are studied. The nature of the destruction of samples is described. Weaknesses of the designed structure have been identified. The hypothesis about the possibility of using the proposed structures both for temporary buildings and for the construction of capital buildings is confirmed. Conclusions are drawn on the further study of this type of structures.

**Keywords:** wooden structures, screwed-in rods, power frame, beams of composite section, shear deformations, nonlinear deformations, experimental samples.

The work was supported by a grant from NRU MSUCE. Order 453/130 dated May 15, 2023 “On the implementation of projects supported by the results of the 2023 competition for fundamental and applied scientific research (R&D) by the research teams of NRU MSUCE”.

**For citation:** Klyukin A.A. Experimental studies of compressed-bendable elements of composite cross-section on screwed-in rods. *Zhilyshchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2023. No. 12, pp. 58–65. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-58-65>

В работах В.И. Линькова [1–4] рассмотрены прочностные и деформационные характеристики соединений деревянных элементов на наклонных металлических стержнях (НМС-соединения) без применения

клея, полученные по результатам испытаний образцов соединений. Разработана номенклатура несущих конструкций пролетом от 6 до 21 м на основе деревянных элементов составного сечения с НМС-соединениями.

Проведены экспериментальные исследования соединений деревянных элементов на наклонных металлических стержнях с комбинированными шайбами. Проведено сравнение несущей способности и деформативности НМС-соединений на комбинированных шайбах и на наклонных ввинченных стержнях. Проанализирована несущая способность НМС-соединений на комбинированных шайбах по методике ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Выполнено сравнение несущей способности и деформативности НМС-соединений по разрушающей нагрузке, верхней границе области упругой работы, усилию достижения предельной деформации, а также по критерию деформативности НМС-соединений, абсолютной величине полных деформаций, доле упругих и остаточных деформаций для каждого типа НМС-соединений. Получены коэффициенты условия работы соединений кж, отражающие снижение несущей способности деревянного элемента составного сечения при достижении соединением предельно допустимой деформации.

Рассмотрены результаты испытаний серии односрезных образцов соединений деревянных элементов на наклонных металлических стержнях, в которых усилие между стержнем и древесиной передается через шайбы. Расчетная несущая способность НМС-соединения определена с учетом изменений в СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции». Представлены результаты сравнительных испытаний образцов соединений на наклонных стержнях с резьбой, ввинченных в древесину с клеем и без клея. В работах С.Б. Турковского, А.А. Погорельцева, И.П. Преображенского [5] отражен накопленный опыт по проведению испытаний и проектированию деревянных конструкций. Рассматриваются деревянные конструкции с применением клеенных стержней. Описано использование нового вида соединений в узловых сопряжениях и стыках конструкций, позволяющее получить большепролетные сборные конструкции повышенной надежности, в том числе уникальные. Обозначена возможность на основе серийно изготавливаемых унифицированных элементов создавать самые различные конструктивные системы.

В работе [6] приведены результаты исследования напряженно-деформированного состояния изогнутого жесткого соединения. Установлено, что высота зоны компрессионного соединения зависит от деформационной способности соединения закладных деталей, уровня напряжений в соединительных пластинах и от упругих характеристик древесины. Деформационная способность соединения закладных деталей в зоне сжатия больше, чем деформационная способность соединения закладных деталей в зоне растяжения. Разработана система узловых соединений деревянных конструкций на наклонных клеенных стержнях.

Предлагаются два типа жестких соединений: с однонаправленными наклонными клеиваемыми стержнями и с клеиваемыми стержнями, образующими V-образные анкеры [7]. Разработана методика расчета узлов и стыков на клеенных стержнях. В [8] приведены результаты экспериментальных исследований несущей способности клеенных и ввинченных поперек волокон древесины стальных стержней.

В трудах [9–11] приведен алгоритм расчета балочных деревянных конструкций, усиленных путем увеличения поперечного сечения с использованием витых крестообразных нагелей. С использованием численных методов усовершенствована методика определения временного сопротивления древесины смятию в отверстии нагелями витой формы крестообразного поперечного сечения. Для усиления конструкций разработан стальной стержень витой формы крестообразного поперечного сечения. Проведены испытания конструкций. Получены новые экспериментальные данные о напряженно-деформированном состоянии изгибаемых балочных конструкций, усиленных путем увеличения поперечного сечения с использованием стальных витых крестообразных стержней.

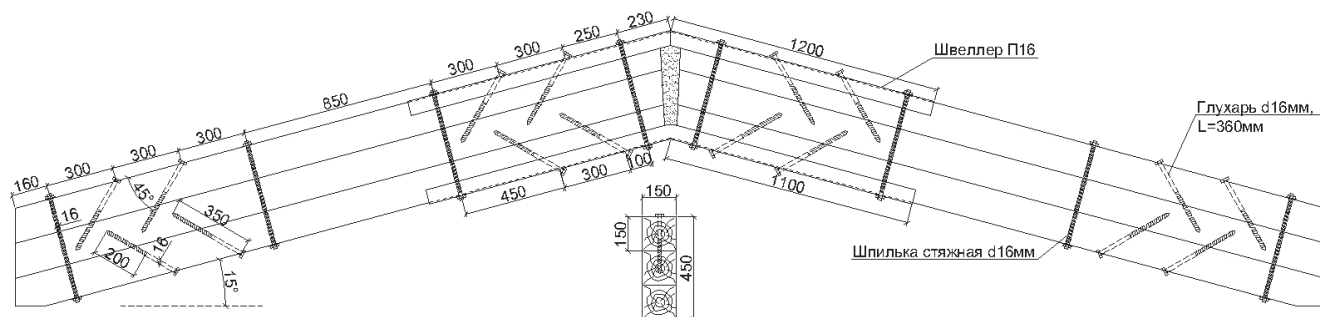
В исследованиях К.П. Пятикрестовского и В.И. Травуша [12, 13] рассматриваются статически неопределимые деревянные конструкции при несимметричных нагрузках. Используются свойства древесины и конструкций из нее – ползучесть, приспособляемость, живучесть для восприятия длительных нагрузок, в том числе запроектных. Предлагаются новые быстровозводимые легкие конструкции из цельной древесины с соединениями сплачивания и наращивания металлическими винтами для дерева.

Рассмотренные научные источники позволяют сделать вывод о необходимости применения деревянных конструкций с применением наклонных металлических стержней.

Задачи исследований: отработка методики испытаний сжато-изгибаемых конструкций на наклонных ввинченных стержнях; исследование влияния конструктивных особенностей (наличие стыка в узле перегиба, соединения на ввинченных стержнях); определение характера разрушения конструкции.

### Материалы и методы

На экспериментальном полигоне МГСУ и в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко испытаны образцы ребер (рис. 1) – основной силовой элемент конструкции. Экспериментальные образцы представляют собой элементы ребер покрытий в виде призматических сводов или шатровых конструкций. Пролет покрытий составляет от 12 до 30 м; при этом ребро конструкции собирается из 2, 4, 6 или 8 элементов, стыкуе-



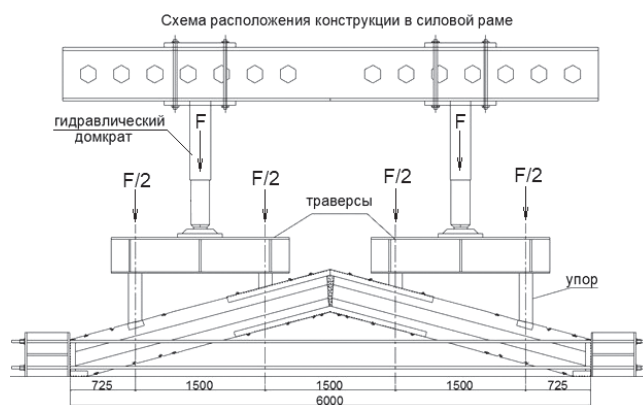
**Рис. 1.** Схема экспериментального образца и расположение связей между брусьями  
**Fig. 1.** Diagram of the experimental sample and the location of the connections between the beams

мых между собой по длине при помощи соединения закладных деталей, которые могут быть разъемными для образования сборно-разборных конструкций. Экспериментальные образцы состоят из двух прямолинейных стержней, соединяемых между собой под углом, соответствующим профилю здания. Угол составляет  $15^\circ$ .

Соединение прямолинейных стержней и образуемых из них монтажных элементов производится под углом  $15^\circ$ . Прямолинейные брусья монтажных элементов образуются сплачиванием двух или трех брусьев сечением  $15 \times 15$  см (в эксперименте приняты  $3 \times (15 \times 15$  см), т. е.  $15 \times 45$  см. Сплачивание и образование стыков монтажных элементов осуществляется ввинчиваемыми стержнями для древесины, когда с каждой стороны стыка как по верхней, так и по нижней установлены по два наклонных стержня диаметром 16 мм, длиной 350 мм под углом  $45^\circ$  к оси брусьев. По верхней и нижним граням элемента установлены швеллеры № 16 длиной 1200 мм, которые привариваются в узле друг к другу, а к деревянным элементам швеллеры прикрепляются двумя наклонными стержнями с головкой, привариваемой к швеллерам после завинчивания стержней в древесину. Стержни имеют нарезку (резьба для дерева) длиной 230 мм, а часть стержня, примыкающая к головке, не имеет резьбы. При этом максимальное усилие выдергивания стержня (при несущей способности на выдергивание 1,3 МПа) составляет 30 кН. Кроме этих стержней в зоне стыка располагаются шпильки сплачивания по 2 шт.

В шве стыка выполнено замоноличивание полимерным составом, смешанным с цементным вяжущим. Все трещины заполнены эпоксидной смолой с отвердителем. Все элементы соединения выполнены из материалов, наиболее доступных для изготовления на полигоне МГСУ в построечных условиях. Для разработки реальных проектов принятые конструктивные решения усовершенствованы.

Нагрузки на образец прикладываются в виде четырех сосредоточенных сил (рис. 2). Условная максимальная суммарная нагрузка, допускаемая имею-



**Рис. 2.** Схема нагружения образца  
**Fig. 2.** Sample loading diagram

мися приспособлениями, составляет 400 кН. После предварительных испытаний этапы нагружения уточнены и составляют 80 кН.

### Методика проведения испытаний

**Подготовительные мероприятия.** В соответствии с программой работы выполнена подготовка образцов к испытаниям. Выполнена проверка несущей способности опорного узла при передаче распора от конструкции с приложением опорной реакции под углом к волокнам. Выполнена проверка на смятие древесины в местах приложения сосредоточенных нагрузок и в опорных узлах. Выполнена расстановка приборов на конструкции (рис. 3).

Разработаны, изготовлены и установлены страховочные устройства, обеспечивающие неизменность положения испытуемого образца в силовой раме. Проверяется готовность приборов и установки к началу испытаний. Убираются все посторонние предметы в зоне нахождения образца и сотрудников, участвующих в испытании. Зарисовываются все имеющиеся повреждения конструкции.

**Проведение испытаний образцов № 1.** Дважды с интервалом 10 мин снимаются отсчеты со всех приборов. Проверяется совпадение отсчетов и уточняется последовательность обхода приборов при испы-

Рис. 3. Схема расположения электронных прогибомеров и индикаторов часового типа

Fig. 3. Scheme of layout of electronic deflection meters and dial indicators

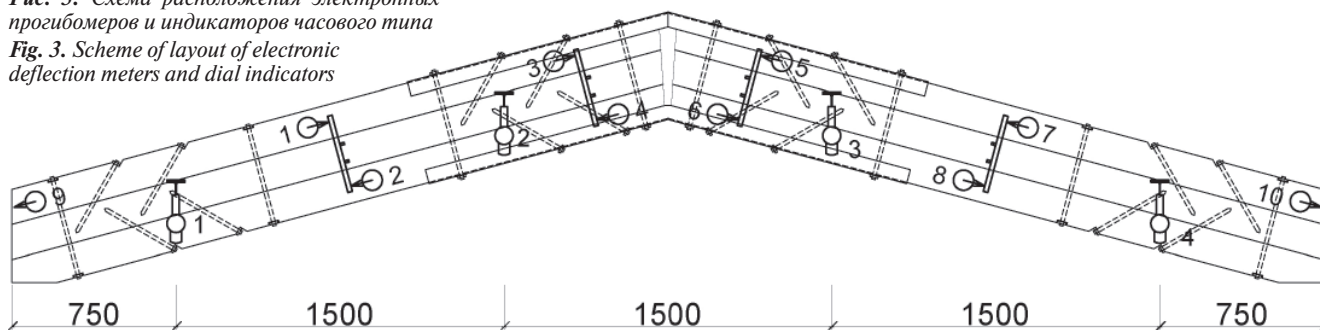
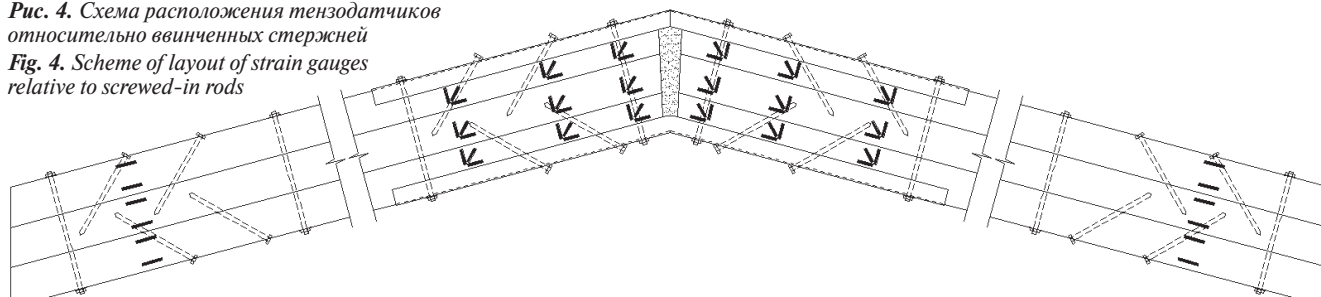


Рис. 4. Схема расположения тензодатчиков относительно винченных стержней

Fig. 4. Scheme of layout of strain gauges relative to screwed-in rods



таниях. Устраняются возможные сбои в показаниях приборов. Повторяется снятие «нулевых» отсчетов до их стабильности. Предварительно устанавливается предельная нагрузка при первых этапах нагружения, равная 400 кН (200 кН на каждую траверсу) при приложении нагрузки по всему пролету. Эта нагрузка уточняется при первых (пробных) нагружениях этапами по 10 кН на траверсу. После приложения нагрузки дается выдержка 5–10 мин. Выполняется осмотр. Снимаются отсчеты со всех приборов. В случае наличия значимых показаний и сохранения целостности конструкции этот этап нагружения повторяют до совпадения отсчетов на предыдущем и последующем этапах. В случае необходимости величина нагрузки на этап корректируется, а нагрузка повторяется до устранения «рыхлых» деформаций. Аналогично в случае отсутствия повреждений выполняется ступенчатое повышение нагрузки.

Должно быть линейное приращение нагрузки. В случае появления нелинейных деформаций или перемещений делается пауза в повышении нагрузок и выполняется промежуточный анализ состояния конструкций. Производится разгрузка конструкций теми же этапами до стабилизации. В зависимости от результатов этого анализа принимается решение о продолжении испытаний. При осмотре конструкции особое внимание уделяется состоянию швов между брусками. В случае успешного нагружения до 400 кН и выдержки конструкции под этой нагрузкой до полного затухания деформаций возможно увеличение нагрузки после анализа и обследования конструкции.

Как видно из схемы расстановки датчиков, наиболее плотно они расположены в месте перегиба

конструкции. Ближе к опорным узлам датчики расположены по классической схеме, как в балках составного сечения, т. е. в верхней и нижней зонах на каждом бруске. Такое расположение выбрано, чтобы выявить особенности совместной работы элементов составной конструкции.

Для отработки методики испытаний в условиях современного полигона с применением силовой рамы было принято решение один из образцов загрузить путем приращения деформаций на гидродомкратах, а не подачи на них определенных усилий. Данный способ исключает преждевременное разрушение по второму предельному состоянию, так как ведется постоянный контроль перемещений и исключение развития пластических деформаций.

Каждый этап нагружения длился 8 мин. Нагружение конструкции до заданного значения выполнялось с постоянной скоростью. Затем заданное перемещение поддерживалось в течение 10 мин. При этом к концу каждого этапа усилие отпора в точках приложения нагрузки несколько снижалось (рис. 5).

Из графика видно, что левая половина конструкции (пунктирная линия) давала несколько больший отпор, чем правая (сплошная линия). Разгрузка после каждого этапа не выполнялась, максимальная реакция на домкрате достигала 48 кН в каждой точке нагружения. При этом раскрытия существующих трещин и появления новых не зафиксировано.

Из рис. 6 видим, что прогиб возрастал равномерно на всех этапах нагружения и не превышал критического значения. После выдержки конструкции под нагрузкой значения на прогибомерах со временем уменьшались.

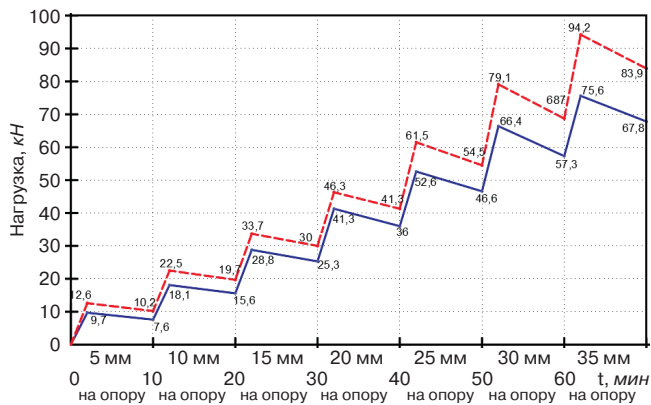


Рис. 5. Зависимость усилий в загрузочных упорах от приращения перемещений в гидродомкратах

Fig. 5. Dependence of forces in loading stops on incremental movements in hydraulic jacks

После предварительного нагружения принято решение перейти к основному этапу испытаний описанному выше.

### Результаты исследования

До разрушения образцы не доводят. Напряжения, полученные в сечениях, показаны на рис. 7.

Второй образец испытываем по тому же плану. Из полученных результатов видно, что значения на эпюрах на всех этапах достаточно близки. Брусья работают как отдельные элементы. До начала испытаний были зафиксированы и замерены все трещины на образцах. Крупные трещины фиксировались линейкой, а тонкие при помощи отсчетного микроскопа типа МПБ-2. В ходе проведения испытаний новых трещин не обнаружено, а раскрытия уже имеющихся не происходило. Сквозных трещин усушки в брусках не обнаружено. Трещины в замоноличенной части отсутствовали до испытаний и не появились в ходе последних.

Отсутствие новых трещин и значительного развития существующих подтверждает, что брусья не работали как единый элемент в полной мере. Работа такого пакета из отдельных элементов как цельного сечения подразумевала бы меньшие деформации сдвига и большее развитие трещин и сдвиг по продольным трещинам в каждом отдельном элементе.

### Анализ эксперимента

Первый этап испытаний на полигоне НИУ МГСУ показал достаточную прочность испытываемых образцов, выявил все неточности в проведении испытаний. Определено влияние винченных стержней в узле перегиба на деформативность конструкции.

**Проведение испытаний образцов № 2.** Подготовительный этап проходил по плану уже проведенных испытаний. Нагружение конструкции выполнялось поэтапно с последующей разгрузкой. Схема расположения приборов показана на рис. 8.

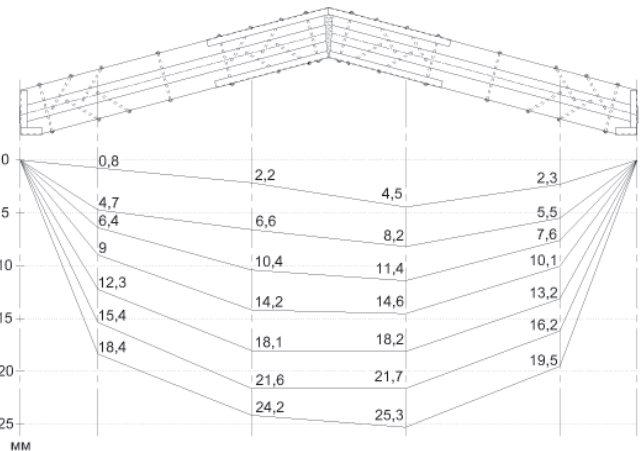


Рис. 6. Прогобы конструкции при предварительном нагружении в зависимости от перемещений на домкратах

Fig. 6. Deflections of the structure during pre-loading depending on movements on jacks

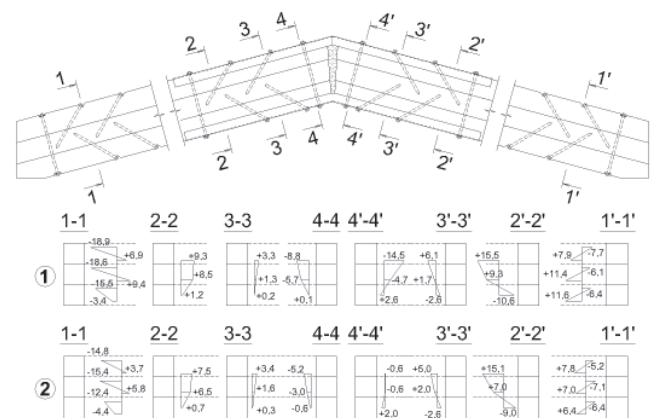


Рис. 7. Эпюры нормальных напряжений, МПа. Нагружение до 160 кН на траверсу: 1 – этап № 1; 2 – этап № 2

Fig. 7. Diagrams of normal stresses, MPa. Loading up to 160 kN on the crossbeam: 1 - stage No. 1; 2 - stage No. 2

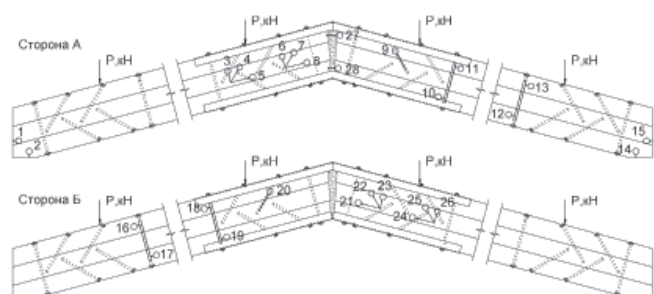


Рис. 8. Схема расположения индикаторов часового типа

Fig. 8. Scheme of layout of dial indicators

После каждого этапа конструкция осматривалась на предмет появления новых трещин и раскрытия существующих. Нагрузка прикладывалась равномерно, с одинаковой скоростью. После нагрузка не снималась 10 мин, проводились осмотр конструкции и снятие отчетов с приборов. Далее нагрузка понижалась до нуля и конструкция выдерживалась без нагрузки 10 мин. Снова проводился осмотр. Если нет повреж-

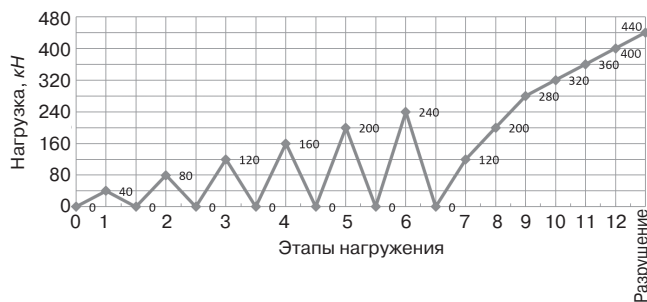


Рис. 9. График этапов нагружения и разгрузки  
Fig. 9. Schedule of loading and unloading stages

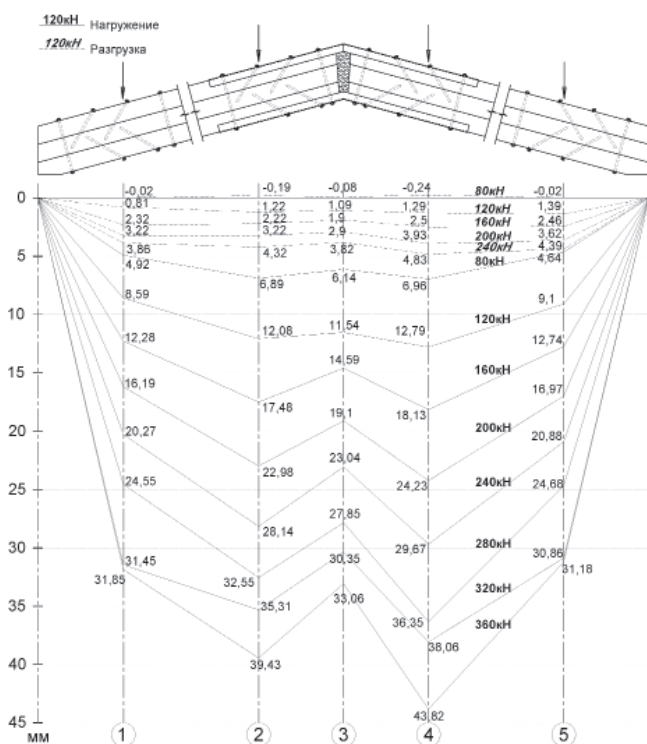


Рис. 10. Прогибы конструкции. Испытание № 1  
Fig. 10. Structural deflections. Test No. 1

дений узлов и элементов конструкции, можно переходить к следующему этапу. На последних этапах разгрузка не производилась (рис. 9), так как была задача довести конструкцию до разрушения.

На рис. 10 и 11 видим, что максимальные значения прогибов зафиксированы в пролете, а именно в точках приложения нагрузки. При небольших нагрузках конструкция прогибалась равномерно и симметрично относительно оси 3 по всей длине. После нагружения 160 кН стала заметна разница между деформациями в коньке и деформациями в пролете. При нагружении 280 кН и более начали развиваться деформации, превышающие предельные. Рост прогибов конструкции по оси 3 отстает от роста прогибов по осям 2 и 4. Расчет конструкции показал перераспределение сжимающих усилий в сторону верхней грани по оси 3.

После испытаний второго образца можно сделать вывод, что конструкция работает стабильно до нагру-

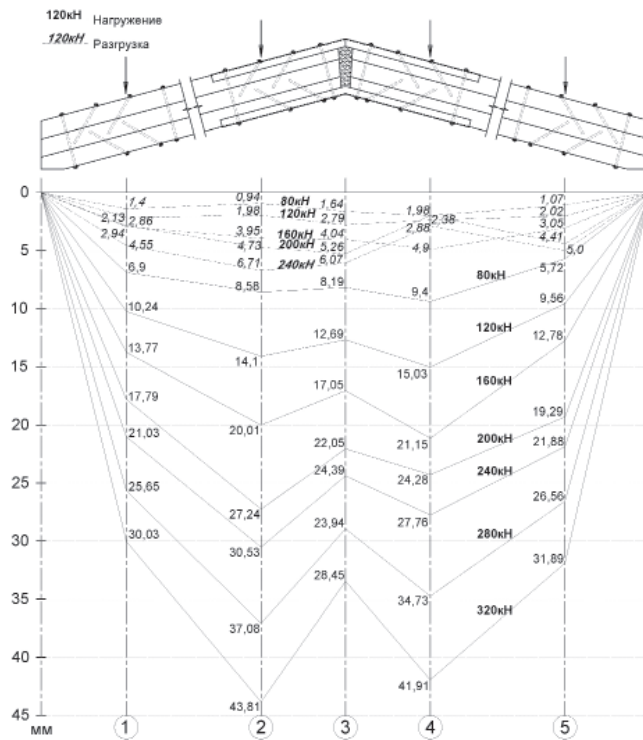


Рис. 11. Прогибы конструкции. Испытание № 2  
Fig. 11. Structural deflections. Test No. 2

жения в 280 кН. После этого этапа развиваются пластические деформации, но конструкция продолжает нести нагрузку. Оба образца были доведены до разрушения по брусам, вид которого показан на рис. 12.

Испытуемые образцы разрушались при нагрузке 370 и 440 кН соответственно. Нагрузка выдерживалась в течение трех минут. Разрушение имело пластический характер (не было хрупким). Рассмотрим характерные черты на одном из образцов.

Произошел раскол нижнего бруса по сучку поперек волокон в зоне сечения приложения силы, частичный раскол среднего бруса (несквозная трещина) поперек волокон и разрушение по существующей трещине вдоль волокон (рис. 16). Произошло полное разрушение верхнего бруса под опорой приложения силы. При последних этапах загрузки 360–400 кН образовались трещины в замоноличенной части (рис. 14). Ширина раскрытия трещин 9–0,4; 10–1,1 мм.

Под расчетной нагрузкой 320 кН образец находился 20 мин. Максимальные прогибы зафиксированы в четвертях пролета. Величина их при этом составляла 43,81 и 41,91 мм соответственно.

Зафиксированные сдвиговые деформации были между средним и верхним брусками 10 мм, что почти в два раза превысило сдвиг в приопорной зоне между нижним и средним – 7 мм. В местах опирания сдвиг при расчетной нагрузке составлял 24 мм, это указывает на то, что в месте перегиба деформации меньше, чем в остальной части пролета. При разру-



Рис. 12. Разрушение конструкции в пролетной части по нижнему и среднему брусам

Fig. 12. Destruction of the structure in the span along the lower and middle beams



Рис. 13. Обследование конструкции после разрушения

Fig. 13. Inspection of the structure after destruction

шении конструкции деформации сдвига в опорной зоне возросли до 20 мм (рис. 15).

При разрушении новых трещин в коньковой части образца не обнаружено, металлический футляр не поврежден.

### Выводы

По результатам выполненных экспериментальных исследований деревянных конструкций на наклонных ввинченных стержнях сформулированы следующие выводы.

Изучена возможность производства и монтажа данных конструкций в построечных условиях с применением простейших инструментов.

### Список литературы

1. Линьков В.И. Конструкции на основе деревянных элементов составного сечения с соединениями на наклонных металлических стержнях без применения клея // *Промышленное и гражданское строительство*. 2012. № 11. С. 29–31.
2. Линьков В.И. Оценка длительной прочности соединений деревянных элементов на наклонных металлических стержнях без применения клея // *Промышленное и гражданское строительство*. 2011. № 3. С. 25–28.

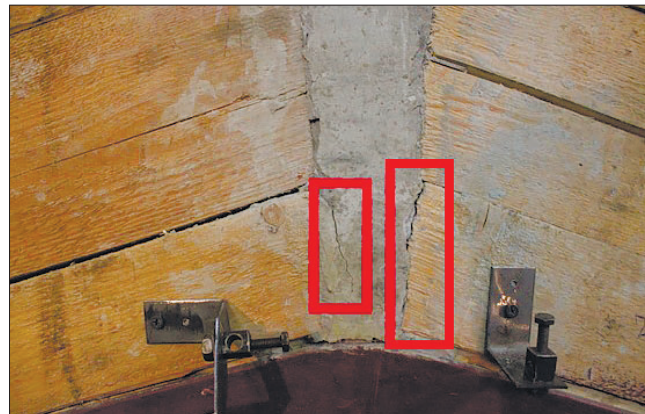


Рис. 14. Образование трещин в монолитной части

Fig. 14. Formation of cracks in a monolithic part

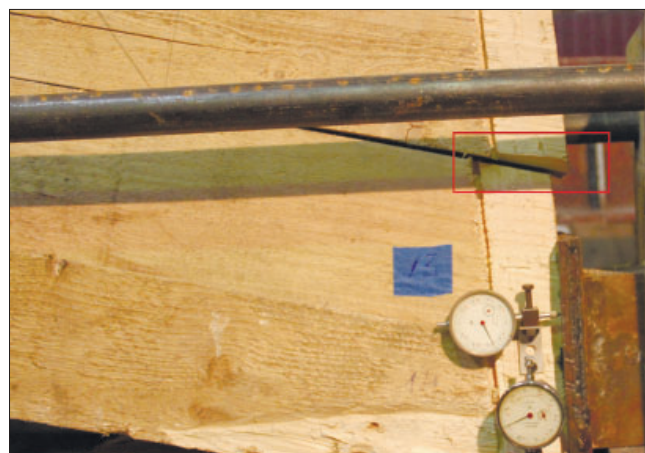


Рис. 15. Опорный участок после разрушения конструкции

Fig. 15. Support section after structural failure

Наиболее неблагоприятное воздействие на конструкцию оказывали деформации сдвига между брусками.

Для эффективного включения в работу трех брусков как единого целого необходима более частая постановка стержней. Поэтому данную конструкцию считаем составной на податливых связях.

Необходима дальнейшая проверка полученных данных и сравнение последних с результатами численного моделирования.

### References

1. Linkov V.I. Constructions based on composite wooden elements with connections on inclined metal rods without the use of glue. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2012. No. 11, pp. 29–31. (In Russian).
2. Linkov V.I. Evaluation of the long-term strength of the joints of wooden elements on inclined metal rods without the use of glue. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2011. No. 3, pp. 25–28. (In Russian).
3. Linkov V.I. Modeling of the work of composite wooden beams on malleable bonds using the theo-

3. Линьков В.И. Моделирование работы деревянных балок составного сечения на податливых связях с применением теории составных стержней А.Р. Ржаницына // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2011. № 5. С. 30–35.
4. Линьков В.И. Несущая способность и деформативность соединений на наклонных стержнях с комбинированными шайбами // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 9. С. 40–43.
5. Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Преображенская И.П. Клееные деревянные конструкции с узлами на вклеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК). М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2013. 308 с.
6. Anatoliy Naichuk, Aleksandr Pogoreltsev, Igor Demchuk, Andrii Ivaniuk, Svetlana Roshchina. Rigid joint of bent glued laminated timber structures using inclined glued-in rods // *Proceedings of MPCPE. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 182. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8\\_45](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_45)
7. Alexander Pogoreltsev, Stanislav Turkovsky, Vladimir Stoyanov. Rigid joints on glued-in rods of bending and compression bending elements of large-span laminated timber structures. *World Conference on Timber Engineering*. Oslo. 2023. Pp. 4201–4208.
8. Найчук А.Я., Бабаев М.В. К вопросу оценки несущей способности стальных винтовых стержней, завинченных под углом к волокнам древесины // *Промышленное и гражданское строительство*. 2010. № 1. С. 21–23.
9. Жаданов В.И., Аркаев М.А., Рожков А.Ф. Учет витой формы крестообразного нагеля в расчете балочных деревянных конструкций при их усилении путем увеличения поперечного сечения // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2016. № 6. С. 55–59.
10. Жаданов В.И., Аркаев М.А., Котлов В.Г. Экспериментальные исследования деревянных балок, усиленных витыми крестообразными стержнями // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 11. С. 5–11.
11. Жаданов В.И., Аркаев М.А., Столповский Г.А. Усиление деревянных конструкций с использованием витых крестообразных стержней // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 5. С. 25–31.
12. Пятикрестовский К.П., Хунагов Х.С. Нелинейные деформации статически неопределимых деревянных конструкций // *Известия вузов. Строительство*. 2013. № 11–12. С. 21–30.
13. Пятикрестовский К.П., Травуш В.И., Погорельцев А.А., Ключин А.А. Разработка конструкций из цельной древесины для объектов инфраструктуры // *Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций*. 2018. Т. 14. № 1. С. 145–154.
- ry of composite rods A.R. Rzhantsyn. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2011. No. 5, pp. 30–35. (In Russian).
4. Linkov V.I. Bearing capacity and deformability of joints on inclined rods with combined washers. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2016. No. 9, pp. 40–43. (In Russian).
5. Turkovsky S.B., Pogoreltsev A.A., Preobrazhenskaya I.P. Kleenye derevyannye konstruksii s uzlami na vkleennykh sterzhnyakh v sovremennom stroitel'stve (sistema TsNIISK) [Glued wooden structures with nodes on glued rods in modern construction (TSNIISK system)]. Moscow: RIF "Stroymaterialy". 2013. 308 p.
6. Anatoly Naichuk, Alexander Pogoreltsev, Igor Demchuk, Andrey Ivanyuk, Svetlana Roshchina. Rigid connection of structures made of bent glued beams using inclined glued rods. *Proceedings of MPCPE. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 182. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8\\_45](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_45)
7. Alexander Pogoreltsev, Stanislav Turkovsky, Vladimir Stoyanov. Rigid joints on glued-in rods of bending and compression bending elements of large-span laminated timber structures. *World Conference on Timber Engineering*. Oslo. 2023, pp. 4201–4208.
8. Naichuk A.Ya., Babaev M.V. On the issue of assessing the bearing capacity of steel screw rods screwed at an angle to wood fibers. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2010. No. 1, pp. 21–23. (In Russian).
9. Zhadanov V.I., Arkaev M.A., Rozhkov A.F. Taking into account the twisted shape of the cruciform nail in the calculation of beam wooden structures when they are reinforced by increasing the cross section. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2016. No. 6, pp. 55–59. (In Russian).
10. Zhadanov V.I., Arkaev M.A., Kotlov V.G. Experimental studies of wooden beams reinforced with twisted cruciform rods. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2017. No. 11, pp. 5–11. (In Russian).
11. Zhadanov V.I., Arkaev M.A., Stolpovsky G.A. Reinforcement of wooden structures using twisted cruciform rods. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2017. No. 5, pp. 25–31. (In Russian).
12. Pyatikrestovsky K.P., Khunagov H.S. Nonlinear deformations of statically indeterminate wooden structures. *Izvestiya of higher educational institutions. Construction*. 2013. No. 11–12, pp. 21–30. (In Russian).
13. Pyatikrestovsky K.P., Travush V.I., Pogoreltsev A.A., Klyukin A.A. Development of solid wood structures for infrastructure facilities. *Mezhdunarodnyi zhurnal po raschetu grazhdanskikh i stroitel'nykh konstruksii*. 2018. Vol. 14. No. 1, pp. 145–154. (In Russian).

УДК 624.012.44

DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-66-71>

П.А. ХАЗОВ, канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией непрерывного контроля технического состояния зданий и сооружений (khazov.nngasu@mail.ru),  
А.П. ПОМАЗОВ, инженер, аспирант (pomazov.a.p@yandex.ru)

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65)

## Экспериментальное исследование продольного и поперечного изгиба трубобетонных стержней

Приведены результаты экспериментальных исследований трубобетонных стержней при испытании на продольный и поперечный изгиб, поскольку эти напряженно-деформированные состояния являются интересными с точки зрения работы строительных конструкций. Для проведения экспериментов изготовлены несколько серий лабораторных образцов длиной 700 мм, представляющих собой стальные трубы с монолитным сердечником из мелкозернистого бетона. Представлены схемы испытательных установок и описаны методики проведения экспериментов на осевое сжатие с последующей потерей устойчивости и на трехточечный изгиб сосредоточенной поперечной нагрузкой. На основании экспериментальных данных построены диаграммы деформирования, которые сопоставляются с деформированием полой стальной трубы. Отмечено, что наличие бетонного сердечника предотвращает преждевременную потерю устойчивости стенки трубы при продольном изгибе, ограничивает локальные деформации за счет искривления сечений при поперечном изгибе, увеличивает упругую область деформаций, а также предотвращает хрупкий характер разрушения, что является важным преимуществом при проектировании зданий.

**Ключевые слова:** трубобетон, экспериментальные исследования, напряженно-деформированное состояние, продольный изгиб, потеря устойчивости, поперечный изгиб.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Нижегородской области (грант Нижегородской области в сфере науки, технологий и техники от 04.07.2023 г. № 316-06-16-118a/23).

**Для цитирования:** Хазов П.А., Помазов А.П. Экспериментальное исследование продольного и поперечного изгиба трубобетонных стержней // *Жилищное строительство*. 2023. № 12. С. 66–71.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-66-71>

P.A. KHAZOV, Candidate of Sciences (Engineering) Associate Professor, Head of the Laboratory of Continuous Monitoring of the Technical Condition of Buildings and Structures (khazov.nngasu@mail.ru),  
A.P. POMAZOV, Engineer, Postgraduate Student (pomazov.a.p@yandex.ru)

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Il'inskaya St., Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation.

### Experimental Study of Longitudinal and Transverse Bending of Pipe Concrete Rods

The results of experimental studies of pipe-concrete rods during longitudinal and transverse bending tests, since these stress-strain states are of interest from the point of view of the operation of building structures, are presented. To carry out the experiments, several series of laboratory samples 700 mm long were made, which were steel pipes with a monolithic core made of fine-grained concrete. Diagrams of test installations are presented and methods for conducting experiments on axial compression with subsequent loss of stability and three-point bending with concentrated lateral load are described. Based on experimental data, deformation diagrams are constructed and compared with the deformation of a hollow steel pipe. It is noted that the presence of a concrete rod prevents premature loss of stability of the pipe wall during longitudinal bending, limits local deformations due to the curvature of sections during transverse bending, increases the elastic region of deformations, and also prevents the brittle nature of destruction, which is an important advantage in the design of buildings.

**Keywords:** pipe concrete, experimental studies, stress-strain state, longitudinal bending, loss of stability, transverse bending.

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Nizhny Novgorod Region (grant of the Nizhny Novgorod Region in the field of science, technology and engineering dated 07/04/2023 No. 316-06-16-118a/23).

**For citation:** Khazov P.A., Pomazov A.P. Experimental study of longitudinal and transverse bending of pipe concrete rods. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2023. No. 12, pp. 66–71. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-66-71>

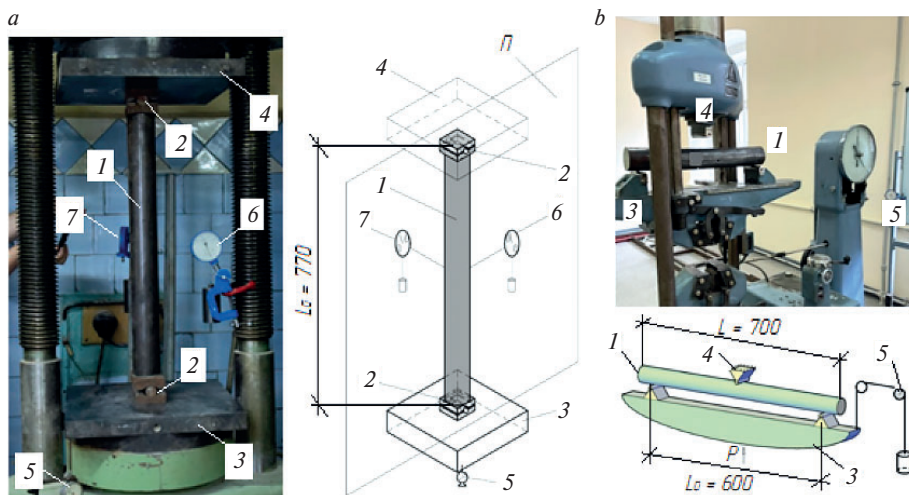
Развитие уникального и высотного строительства, наблюдаемое со второй половины XX в., диктует необходимость внедрения новых материалов и созданных на их основе композитов, метаматериалов и прочих модификаций, позволяющих многократно увеличить прочность и несущую способность конструкций, а также обеспечить наиболее рациональное использование и учет особенностей каждого материала по отдельности. Одним из направлений, активно внедряемых в конструкции зданий и сооружений, является развитие трубобетонных элементов, обладающих рядом свойств, отличающих их от классических металлических или железобетонных конструкций. В первую очередь это взаимное усиление металлической оболочки и бетонного (железобетонного) сердечника за счет ограничения радиальной податливости и предохранения от потери устойчивости. Таким образом, эффект, достигнутый от применения трубобетона, значительно превышает простую сумму несущих способностей компонентов конструкции по отдельности. Это позволяет считать трубобетон композитным материалом, а исследования в этом направлении становятся весьма актуальными.

Несмотря на успешный опыт применения конструкций данного рода [1–4], современная нормативная документация остается недостаточно проработанной ввиду ограниченной экспериментальной базы. В частности, недостаточно изучены вопросы адгезии сердечника со стальной оболочкой, степень включен-

ности бетона в процесс общей потери устойчивости стержня, проблематичным остается качественная оценка огнестойкости трубобетонных колонн.

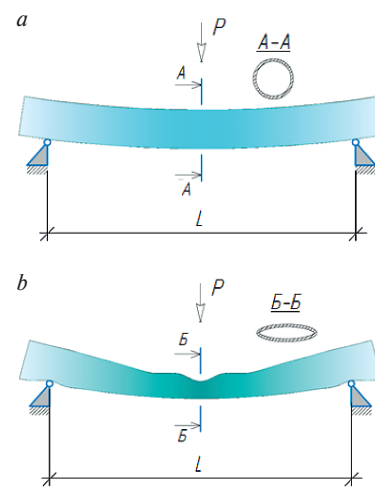
Самым очевидным применением трубобетонных стержней является устройство колонн высотных и уникальных зданий, несущих колоссальные нагрузки. Экономия, получаемая за счет взаимного усиления материалов, составляющих трубобетонное сечение, позволяет уменьшить поперечные размеры колонны в 2–2,5 раза, что, учитывая размеры поперечного сечения колонн высотных зданий, приводит к увеличению полезной площади в окрестности одной колонны на 2 м<sup>2</sup> и более. В свою очередь, простой подсчет количества колонн и этажей высотных зданий говорит о существенном увеличении полезной площади, а впоследствии об инвестиционной привлекательности объекта.

Любая колонна высотного здания является сжато-изогнутым элементом, следовательно, для создания расчетных методик, позволяющих оценить жесткость и прочность конструкции, необходимо дифференцированное изучение особенностей работы трубобетонных стержней на сжатие и изгиб. Изучению центрального сжатия трубобетонных образцов посвящено большое количество работ [5–10], но, как правило, они ограничены продольным деформированием ввиду малых значений гибкости. В настоящей статье представлены экспериментальные результаты исследований гибких трубобетонных образцов при продольном поперечном изгибе. В реальной колонне



**Рис. 1.** Экспериментальная установка для испытаний стержней на продольный изгиб и ее принципиальная схема (а); то же для испытаний на поперечный трехточечный изгиб (б): П – плоскость потери устойчивости; 1 – испытуемый трубобетонный образец; 2 – цилиндрический шарнир; 3 – подвижная нагружающая траверса; 4 – неподвижная траверса; 5 – индикатор сближения пластин часового типа; 6, 7 – индикаторы горизонтальных перемещений среднего сечения стержня в плоскости и из плоскости потери устойчивости

**Fig. 1.** Experimental installation for testing rods for longitudinal bending and its schematic diagram (a); the same for testing for transverse three-point bending (b): П – is the plane of loss of stability; 1 is the test tube-concrete sample; 2 – a cylindrical hinge; 3 – a movable loading traverse; 4 – a fixed traverse; 5 – an indicator of the convergence of hour-type plates; 6, 7 – indicators of horizontal movements of the middle section of the rod in and out of the plane of loss of stability



**Рис. 2.** Схемы деформаций трубобетонной балки: идеализованная (а) и с учетом искривления сечений и локального смятия (б)

**Fig. 2.** Schemes of deformations of a tube-concrete beam: idealized (a) and taking into account the curvature of sections and local crumpling (b)

продольный изгиб вызывается, как правило, гравитационными нагрузками, приводящими к возникновению значительных продольных сил. В свою очередь, поперечный изгиб возникает за счет значительных горизонтальных нагрузок, прежде всего ветровых и сейсмических, являющихся доминантными для высотных зданий.

### Материалы и методы

Экспериментальные исследования проведены при помощи испытательных машин – гидравлического прессы П-125 с максимальной сжимающей силой 1250 кН, а также универсальной машины УИМ-30, позволяющей проводить испытания при

растяжении, сжатии и изгибе. Для исследования были изготовлены трубобетонные стержни длиной 700 мм, в качестве оболочки использовались прямшовные трубы диаметром 60; 76 и 102 мм с толщиной стенки 2; 3 и 3,5 мм соответственно. Бетонный сердечник изготавливался из мелкозернистого бетона марки В12,5. Подготовка стальных труб велась с применением технологии лазерной резки. Для дальнейшего совершенствования торцов готовых трубобетонных стержней насыщение бетонной смесью проводилось с излишком 1–2 см, а после схватывания и набора первичной прочности выполнялась обработка напильником. Класс бетона определялся проведением испытаний контрольных

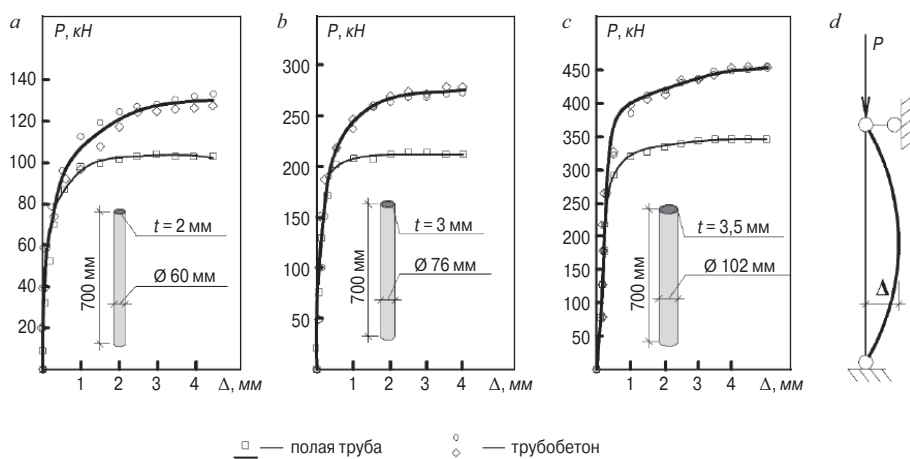


Рис. 3. Диаграммы поперечных деформаций в плоскости потери устойчивости при продольном изгибе трубобетонных стержней (а) и полой трубы (б); расчетная схема (с) и измеряемые перемещения (д)

Fig. 3. Diagrams of transverse deformations in the plane of loss of stability during longitudinal bending of tube-concrete rods (a) and hollow pipe (b); calculation scheme (c) and measured displacements (d)

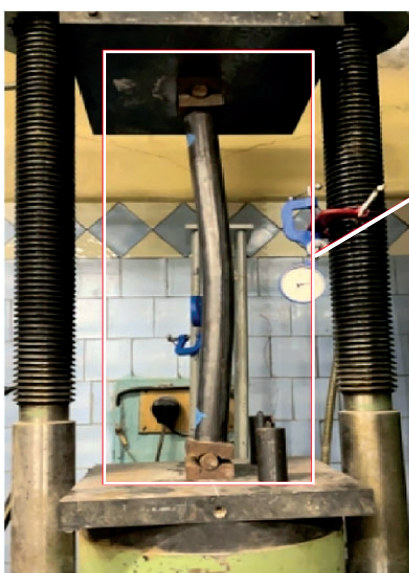


Рис. 4. Потеря устойчивости и анализ характера разрушения бетонного сердечника вскрытого трубобетонного образца

Fig. 4. Loss of stability and analysis of the nature of destruction of the concrete core of the opened pipe-concrete sample

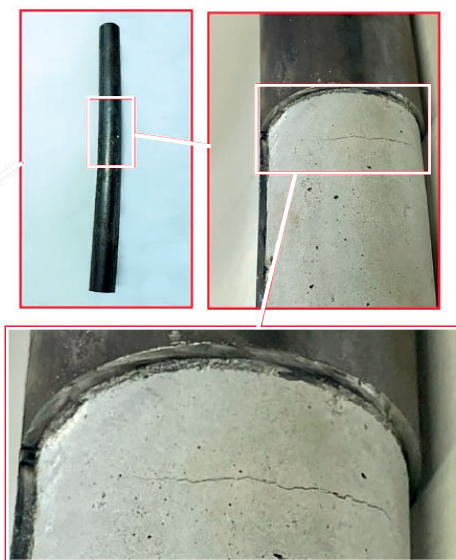


Рис. 5. Разрушение трубобетонной балки по нормальному сечению

Fig. 5. Destruction of a tube-concrete beam along a normal cross section

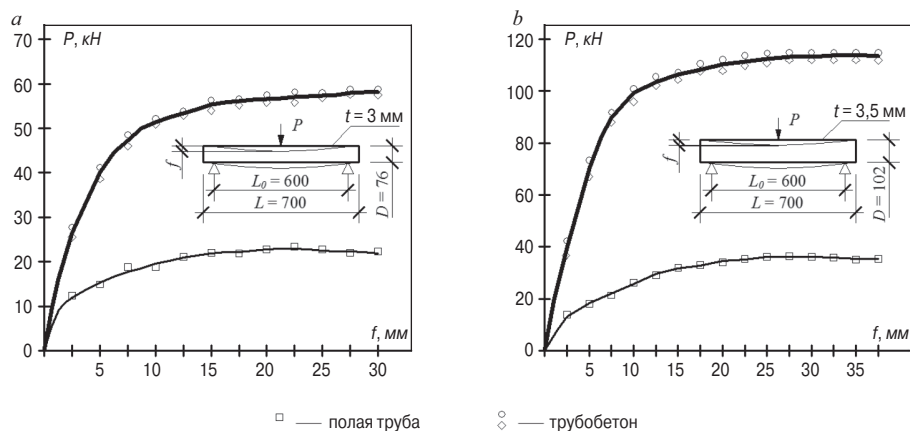


Рис. 6. Экспериментальные диаграммы деформирования трубобетонной балки (а) и полой трубы (б) при трехточечном поперечном изгибе

Fig. 6. Experimental diagrams of deformation of a tube-concrete beam (a) and a hollow pipe (b) at three-point transverse bending

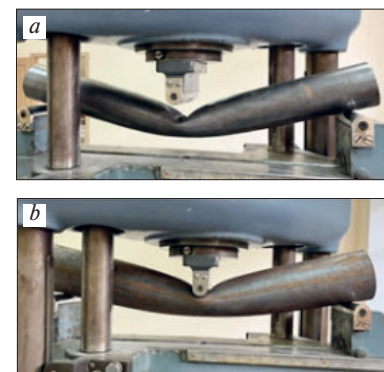


Рис. 7. Общий вид деформированных в результате трехточечного изгиба образцов полой трубы 76×3 (а) и 102×3,5 (б)

Fig. 7. General view of hollow tube samples 76×3 (a) and 102×3.5 (b) deformed as a result of three-point bending

образцов, для которых создавались максимально приближенные условия твердения. Несущая способность трубы без учета потери устойчивости определялась путем испытаний контрольных образцов диаметром 100 мм. Также для оценки вклада бетонного сердечника стержни всех размеров дублировались в пустотелом исполнении.

В работах [11–13] приведены результаты испытаний коротких стержней, которые использовались для определения коэффициентов продольного изгиба в настоящей статье. На рис. 1, а представлена экспериментальная установка для испытаний стержней на продольный изгиб, а также ее принципиальная схема. Для оценки продольного деформирования фиксировалось сближение пластин прессы 5, а при помощи индикатора перемещений часового типа отслеживалось смещение середины стержня в плоскости потери устойчивости 6. Несмотря на предположение, что продольный изгиб произойдет в плоскости, перпендикулярной осям цилиндрических шарниров, осуществлялся контроль отсутствия горизонтальных перемещений из плоскости потери устойчивости 7.

Испытания образцов на поперечный изгиб по трехточечной схеме осуществлялись на установке, показанной на рис 1, б. При этом в измеряемые перемещения были включены локальные деформации (рис. 2), в дальнейшем позволяющие оценить вклад бетона в сравнении с полой трубой.

Во всех экспериментах нагрузка на образцы подавалась равномерно, при этом производилась видеофиксация процесса деформирования и потери устойчивости/разрушения стержней.

### Результаты испытаний при продольном изгибе

При продольном изгибе удалось добиться потери устойчивости всех стержней, изготовленных для

испытаний. В качестве изучаемого параметра был принят вклад бетонного сердечника в несущую способность, выраженный как прирост несущей способности трубобетонного стержня по отношению к пустотелой трубе.

Следует отметить, что в бетонном сердечнике не произошло разрушений, характерных для бетонных и железобетонных конструкций, связанных с выкрашиванием бетона в поперечном направлении и резкой потерей несущей способности, что в реальных условиях при наступлении аварийной ситуации может привести к мгновенному обрушению. В частности, при землетрясении на юго-востоке Турции и прилегающих районах Сирии в феврале 2023 г. мгновенное разрушение несущих конструкций зданий стало важной причиной множества человеческих жертв, число которых вполне могло сократиться при использовании материалов, не подверженных мгновенному хрупкому разрушению.

По диаграммам, представленным на рис. 3, можно заметить качественное совпадение процесса потери устойчивости независимо от диаметра образцов. Вклад бетонного сердечника на каждом этапе деформирования в относительных величинах составляет порядка 30%. Испытания коротких образцов бетона и полой трубы показали, что относительная несущая способность составила 0,16–0,2 для сечений разных габаритов [12].

В исследовании [14] приводятся результаты испытаний коротких трубобетонных образцов, по результатам которых видно, что бетон деформируется пластически в результате обжатия, при этом не возникает видимых макротрещин. В случае потери устойчивости в сердечнике возникает растянутая зона, что приводит к образованию поперечной трещины (рис. 4), что приводит к снижению относительного вклада бетона в работу длинных стержней.

### Результаты испытаний при поперечном изгибе

Испытания при поперечном изгибе проводятся в первую очередь для оценки деформативно-жесткостных характеристик трубобетонных элементов, которые необходимы при расчете статически неопределимых систем.

В результате проведенных испытаний произошло разрушение стальной трубы в растянутой зоне (рис. 5). Несмотря на образование трещины, разрушение происходило плавно, о чем свидетельствуют приведенные на рис. 6 диаграммы. Переход диаграммы в горизонтальную ветвь произошел без видимых скачков или изломов.

На рис. 6 показаны диаграммы деформирования трубобетонной балки и полый трубы при трехточечном поперечном изгибе. Из сравнения графиков полученных зависимостей видно, что наличие бетонного сердечника в тонкостенной трубе ( $D/t=25-30$ ) существенно улучшает как прочностные, так и деформативные свойства.

На рис. 7 показан внешний вид образцов полый трубы после испытаний, отмечается значительная потеря формы сечения в зонах вблизи подающей нагрузки траверсы, в связи с чем даже при небольших нагрузках труба начинает нелинейно деформироваться за счет искривления поперечных сечений.

На рис. 5 видно, что в случае поперечного изгиба трубобетонной балки также имеют место явно выраженные локальные деформации под сосредоточенной нагрузкой, однако в целом сечение балки не

теряет форму вплоть до самого разрушения. В упругой области деформирования изгибные деформации преобладают над деформациями смятия. Данный факт позволяет в пределах упругости деформаций использовать гипотезу Бернулли при расчете подобных конструкций, что не представляется возможным при трехточечном изгибе полый балки.

### Выводы

Стальная труба-оболочка ограничивает поперечные деформации бетонного стержня, препятствуя его разрушению и образованию трещин в растянутой зоне. Характер разрушения трубобетонного стержня пластический, в то время как бетон разрушается хрупко, а стенка полый стальной трубы мгновенно теряет устойчивость.

Вклад бетонного сердечника в общую несущую способность при продольном изгибе составил порядка 30% по сравнению с полый трубой, и этот вклад постоянен на каждом этапе деформирования как в упругой области деформаций, так и в пластической.

Наличие бетонного сердечника при поперечном трехточечном изгибе позволило избежать нелинейных деформаций, которые произошли при испытании полый образцов за счет искривления поперечных сечений тонкостенной трубы. Несущая способность увеличилась более чем в два раза. Помимо увеличения прочности, также увеличилась упругая зона деформаций.

### Список литературы

1. Акаев А.И., Магомедов М.Г., Пайзулаев М.М. Перспективы возведения сейсмостойких зданий из трубобетонных конструкций // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2017. Т. 44. № 1. С. 138–149. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-1-138-149
2. Morino S., Tsuba K. Design and construction of concrete-filled steel tube column system in Japan // *Earthquake and Engineering Seismology*. 2005. No. 1. Vol. 4, pp. 51–73.
3. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Ч. 1. Опыт применения трубобетона с металлической оболочкой // *Интернет-журнал «Науковедение»*. 2015. Т. 7. № 4. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/95TVN415.pdf> (Дата обращения: 12.09.2023).
4. Кришан А.Л. Трубобетонные колонны для многоэтажных зданий // *Строительная механика инже-*

### References

1. Akaev A.I., Magomedov M.G., Pajzulaev M.M. Prospects for the construction of earthquake-resistant buildings made of concrete filled steel tubes. *Vestnik of the Dagestan State Technical University. Technical science*. 2017. Vol. 44. No. 1, pp. 138–149. (In Russian). DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-1-138-149
2. Morino S., Tsuba K. Design and construction of concrete-filled steel tube column system in Japan. *Earthquake and Engineering Seismology*. 2005. No. 1. Vol. 4, pp. 51–73.
3. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mihaldykin E.S. On the problem of calculating pipe-concrete structures with a shell made of different materials. Part 1. Experience in the use of pipe concrete with a metal shell. *Internet-zhurnal Naukovedenie*. 2015. Vol. 7. No. 4 (29). URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/95TVN415.pdf> (Date of access 12.09.2023). (In Russian).

- нерных конструкций и сооружений. 2009. № 4. С. 75–80.
5. Кришан А.Л., Суворцев М.М. Экспериментальные исследования прочности гибких трубобетонных колонн // *Вестник МГТУ. Строительные материалы и технологии*. 2013. № 1 (41). С. 90–92.
  6. Lu Y., Na Li, Li S., Liang H. Behavior of steel fiber reinforced concrete-filled steel tube columns under axial compression // *Construction and Building Materials*. 2015. No. 95, pp. 74–85. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.114
  7. Lazovic Radovanovic M.M., Nikolic J.Z., Radovanovic J.R., Kostic S.M. Structural behaviour of axially loaded concrete-filled steel tube columns during the top-down construction method // *Applied Sciences*. 2022. No. 12 (8), 3771. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12083771>
  8. Manikandan K.B., Umarani C. Understandings on the performance of concrete-filled steel tube with different kinds of concrete infill // *Advances in Civil Engineering*. 2021. Vol. 2021. Article ID 6645757. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6645757>
  9. Jielian Zheng, Jianjun Wang. Concrete-filled steel tube arch bridges in China // *ELSEVIER Engineering*. 2018. № 4, pp. 143–155. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.12.003>
  10. Тамразян А.Г., Манаенков И.К. Испытание трубобетонных образцов малого диаметра с высоким коэффициентом армирования // *Строительство и реконструкция*. 2017. № 4 (72). С. 57–62.
  11. Хазов П.А., Ерофеев В.И., Лобов Д.М., Ситникова А.К., Помазов А.П. Экспериментальное исследование прочности композитных трубобетонных образцов малагабаритных сечений // *Приволжский научный журнал*. 2022. № 3 (63). С. 36–43.
  12. Хазов П.А., Помазов А.П. Прочность и продольный изгиб трубобетонных стержней при центральном сжатии // *Строительная механика и конструкции*. 2023. № 2 (37). С. 77–86.
  13. Ерофеев В.И., Хазов П.А., Ситникова А.К. Прочность и устойчивость композитных железобетонных и трубобетонных образцов при статическом нагружении // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2023. № 25 (2). С. 141–153.
  14. Хазов П.А. Трехосное напряженное состояние бетона при продольном деформировании трубобетонных образцов // *Проблемы прочности и пластичности*. 2023. Т. 85. № 2. С. 5–15.
  4. Krishan A.L. Concrete filled steel tubes for multi-storey buildings. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstrukcij i sooruzhenij*. 2009. No. 4, pp. 75–80. (In Russian).
  5. Krishan A.L., Surovcev M.M. Experimental studies of the strength of flexible concrete filled steel tubes. *Vestnik of the Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov*. 2013. No. 1 (41), pp. 90–92. (In Russian).
  6. Lu Y., Na Li, Li S., Liang H. Behavior of steel fiber reinforced concrete-filled steel tube columns under axial compression. *Construction and Building Materials*. 2015. No. 95, pp. 74–85. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.114
  7. Lazovic Radovanovic M.M., Nikolic J.Z., Radovanovic J.R., Kostic S.M. Structural behaviour of axially loaded concrete-filled steel tube columns during the top-down construction method. *Applied Sciences*. 2022. No. 12 (8), 3771. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12083771>
  8. Manikandan K.B., Umarani C. Understandings on the performance of concrete-filled steel tube with different kinds of concrete infill. *Advances in Civil Engineering*. 2021. Vol. 2021. Article ID 6645757. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6645757>
  9. Jielian Zheng, Jianjun Wang. Concrete-filled steel tube arch bridges in China. *ELSEVIER Engineering*. 2018. No. 4, pp. 143–155. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.12.003>
  10. Tamrazyan A.G., Manaenkov I.K. Testing of small diameter concrete filled steel tube samples with high reinforcement coefficient. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2017. No. 4 (72), pp. 57–62. (In Russian).
  11. Khazov P.A., Erofeev V.I., Lobov D.M., Sitnikova A.K., Pomazov A.P. The experimental research of the strength of composite steel tube confined concrete samples of small-sized sections. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal*. 2022. No. 3 (63), pp. 36–43. (In Russian).
  12. Khazov P.A., Pomazov A.P. Strength and longitudinal bending of pipe concrete rods under central compression. *Stroitel'naya mekhanika i konstrukcii*. 2023. No. 2 (37), pp. 77–86. (In Russian).
  13. Erofeev V.I., Khazov P.A., Sitnikova A.K. Strength and stability of composite reinforced concrete and pipe concrete samples under static loading. *Vestnik of the Tomsk State National University of Architecture and Civil Engineering*. 2023. No. 25 (2), pp. 141–153. (In Russian).
  14. Khazov P.A. Triaxial stress state of concrete under longitudinal deformation of tube-concrete samples. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2023. Vol. 85. No. 2, pp. 5–15. (In Russian).

# CONFA 2023. Petro Building Systems объединяет заводы ЖБИ РФ и стран СНГ для обмена опытом!

Компания PBS организовала собственную ЖБИ конференцию – CONFA Petro Building Systems 2023. Мероприятие прошло в Санкт-Петербурге и собрало свыше 100 представителей из России и стран СНГ. Это событие стало идеальной площадкой для обмена опытом, обучения и общения для всех участников.



Первый день CONFA Petro Building Systems был посвящен выступлениям спикеров, среди которых были руководители ЖБИ заводов, а также представители таких известных компаний, как Приволжский Центр Строительные Технологии, ГК «СТРОЙТЕХ», RODEN, Техносвар КС, MC-Vauchemie. Особенностью выступлений были практические кейсы, которые спикеры применяют в своей повседневной деятельности. Выступления затронули такие актуальные темы, как кадровый голод, бережливое производство, поэтапная модернизация заводов, повышение качества изделий, современные добавки и новое оборудование для арматурного цеха.



Главной особенностью была неформальная обстановка, поэтому присутствующие на конференции свободно задавали вопросы и активно участвовали в дискуссиях, общались со своими коллегами по цеху. Возможность встретиться и обсудить важные вопросы в неформальной обстановке оказалась очень ценной для всех участников.



Второй день CONFA начался с экскурсии на новую производственную площадку Petro Building Systems, где участники смогли познакомиться с оборудованием, которое производит компания. Были представлены поворотный стол и рубашка кассетной установки для вертикального формования, формы тюбингов метрополитена и магнитная бортоснастка. Во время экскурсии сотрудники завода и менеджеры PBS рассказывали более подробно о процессе изготовления того или иного оборудования и его преимуществах, а также отвечали на вопросы гостей.



После обеда были проведены камерные дискуссии. Темы для обсуждения участники выбирали самостоятельно, тем самым организаторы максимально учли пожелания каждого. Наиболее актуальными вопросами по итогам голосования оказались:

- повышение качества изделий-добавки, технологические эксперименты, смазки; снижение процента брака;
- повышение оборачиваемости и оптимизация производственного цикла; поэтапная модернизация завода без простоев; запуск нового завода, новые решения по оборудованию;
- магнитная бортоснастка для повышения производительности; бережливое производство.



Участники активно обменивались мнениями и опытом, что способствовало обогащению знаний каждого из присутствующих. Мероприятие получило множество положительных отзывов, и участники выразили желание собираться в таком формате каждый год. Команда Petro Building Systems выражает благодарность своим партнерам: Приволжский Центр Строительные Технологии, RODEN, Техносвар КС, MC-Vauchemie, ГК «СТРОЙТЕХ», ГК «КИП-Сервис», а также спикерам и всем, принявшим активное участие в жизни конференции.

Petro Building Systems гордится тем, что CONFA стала площадкой для обмена опытом и создания новых деловых связей ЖБИ отрасли.

УДК 621.315.1

DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-73-78>

А.В. ТАНАСОГЛО, канд. техн. наук (a.v.tan@mail.ru),  
И.М. ГАРАНЖА, канд. техн. наук (garigo@mail.ru),  
С.Р. ФЕДОРОВА, студентка (MDKmgusu@yandex.ru)

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

## Мониторинг одностоечных свободностоящих опор воздушных линий электропередачи при действии ветровых нагрузок

*Приводятся экспериментальные исследования динамического поведения металлических опор воздушной линии (ВЛ) при действии ветровых нагрузок. Разработана методика и схема проведения эксперимента в два этапа на анкерно-угловой и промежуточной опорах ВЛ 220 кВ «Змиев ТЭС – Залютино». На первом этапе возбуждение колебаний конструкций опор достигалось при помощи ветрового воздействия, на втором этапе фиксировались свободные колебания системы «опора – провода», которые создавались при помощи ручного резонанса. Представлены графики изменения напряжений в элементах конструкций башенных решетчатых опор при ветре вдоль и поперек ВЛ. Экспериментально определены основные собственные частоты колебаний металлических опор, которые отображены на графиках затухания свободных колебаний. Анализ полученных спектров продольных пульсаций скорости ветра позволил сделать вывод о стационарности ветрового потока. Установлена необходимость частотной отстройки конструкции опоры ВЛ от собственной частоты 2,2 Гц, так как внешнее воздействие с данной частотой возможно при обрыве токоведущего провода в одной из фаз. Установлена необходимость совершенствовать не только принципы мониторинга и наблюдений за поведением конструкций в ветровом потоке, но и разработать простые способы учета динамической составляющей при действии природно-климатических и аварийных нагрузок, которые по своей природе являются динамическими явлениями.*

**Ключевые слова:** мониторинг опоры, ветровая нагрузка, собственная частота, вынужденные колебания, башенная опора, воздушная линия электропередачи.

**Для цитирования:** Танасогло А.В., Гаранжа И.М., Федорова С.Р. Мониторинг одностоечных свободностоящих опор воздушных линий электропередачи при действии ветровых нагрузок // *Жилищное строительство*. 2023. № 12. С. 73–78. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-73-78>

A.V. TANASOGLO, Candidate of Sciences (Engineering) (a.v.tan@mail.ru), I.M. GARANZHA, Candidate of Sciences (Engineering), (garigo@mail.ru),  
S.R. FEDOROVA, Student (MDKmgusu@yandex.ru)  
National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl'skoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

### Monitoring of Single-Post Free-Standing Supports of Overhead Power Lines under the Action of Wind Loads

Experimental studies of the dynamic behavior of metal supports of an overhead line (OL) under the action of wind loads are presented. The methodology and scheme of the experiment execution in two stages on the anchor-angular and intermediate supports of the 220 kV overhead line "Zmiev TPP – Zalyutino" have been developed. At the first stage, the excitation of vibrations of the support structures was achieved using wind action, at the second stage, free vibrations of the "support – wires" system were recorded, which were created using manual resonance. Graphs of stress changes in structural elements of tower lattice supports in the wind along and across the overhead line are presented. The main natural frequencies of vibrations of metal supports have been experimentally determined, which are displayed on the free vibration damping graphs. Analysis of the obtained spectra of longitudinal pulsations of wind speed made it possible to conclude that the wind flow is stationary. The necessity of frequency detuning of the overhead line support structure from the natural frequency of 2.2 Hz has been established, since an external effect with this frequency is possible when the live wire breaks in one of the phases. It is necessary to improve not only the principles of monitoring and observing the behavior of structures in the wind flow, but also to develop simple methods to take into account the dynamic component under the action of natural-climatic and emergency loads, which by their nature are dynamic phenomena.

**Keywords:** support monitoring, wind load, natural frequency, forced oscillations, tower support, overhead power line.

**For citation:** Tanasoglo A.V., Garanzha I.M., Fedorova S.R. Monitoring of single-post free-standing supports of overhead power lines under the action of wind loads. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2023. No. 12, pp. 73–78. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-12-73-78>

Воздушные линии характеризуются значительной вариацией не только конструктивных форм, но и геометрических параметров: длина пролетов, разность отметок фундаментов, различные стрелы провеса и т. д. [1–3]. Причем, как правило, даже на одной линии практически невозможно найти строительные

конструкции опор воздушных линий (ВЛ) с абсолютно одинаковыми статическими расчетными нагрузками. Спектр динамических воздействий значительно более широк, и последние не только оказывают значительное влияние на напряженно-деформированное состояние металлических конструкций башен и мачт, но и приво-

дят к усталостным повреждениям, которые в настоящее время достаточно тяжело предсказать из-за значительного количества варьируемых факторов [4–8].

Поэтому ключевая задача исследования – это совершенствовать не только принципы мониторинга и наблюдений за поведением конструкций в ветровом потоке, но и разработать простые способы учета динамической составляющей при действии природно-климатических и аварийных нагрузок, которые по своей природе являются динамическими явлениями.

### **Экспериментальные исследования динамического поведения металлических опор ВЛ при действии ветровых нагрузок**

#### *Методика проведения экспериментальных исследований*

Целью данных экспериментальных исследований являлось изучение динамических свойств опор башенного типа в системе «опора – провода» и определение реакции данных систем на ветровые воздействия.

Для проведения эксперимента выбраны анкерно-угловая опора № 57 (рис. 1) и промежуточная опора № 72 (рис. 2), принадлежащие воздушной линии напряжением 220 кВ «Змиев ТЭС – Залютино». Марка анкерно-угловой опоры – У-38м; марка промежуточной опоры – ПБГ-4 типа «бочка» с глухими зажимами.

Опоры расположены в сельской местности и на пахотных землях Харьковской области. В соответствии с п. 2.5.45 («Правила устройства электроустановок. Глава 2.5. Воздушные линии электропередачи напряжением свыше 1 кВ до 750 кВ». Киев: ОЕП «ГРІФРЕ», 2016. 125 с.) тип местности II. Ориентация линии в данном месте ССЗ–ЮЮВ. Южнее места проведения эксперимента располагалась лесополоса на расстоянии 0,7 км, с остальных сторон на расстоянии более 3 км не было зафиксировано значимых препятствий, вызывающих изменения ветрового потока. Рельеф площадки имеет незначительный уклон 0,5 по направлению ССВ.

При натурном осмотре был выявлен коррозионный износ стальных конструкций опор, который для поясов и наклонных раскосов составил 0,6–0,8 мм, а для горизонтальных распорок, расположенных до уровня нижней траверсы, – 0,6–1 мм. Также были зафиксированы коррозионные повреждения пакетов болтовых соединений. Развития щелевой коррозии отмечено не было.

При подготовке к проведению экспериментальных исследований были проведены тарировочные испытания первичных преобразователей, в частности тензорезисторов и термоанемометрических преобразователей (ТАПТ). После проведения тарировок и выбора места проведения эксперимента осуществлялся монтаж датчиков на конструкцию опоры. Тензо-

датчики крепились в поясах и раскосах приопорной зоны, на поясах нижних траверс. В сечении устанавливалось три тензорезистора (на перьях уголка и по обуху) параллельно оси уголка с отступом 10 мм во избежание влияния краевого эффекта. При наклейке тензодатчиков фиксировалась скорость ветра. При превышении скорости ветра в порыве 2 м/с в процессе наклейки тензодатчиков и полимеризации клея тензодатчики выбраковывались и процесс повторялся. Отклик конструкции измерялся также при помощи измерителей вибрационной скорости типа ВЭГИК, установленных в уровне верхней траверсы, по взаимно перпендикулярным направлениям.

Для мониторинга набегающего воздушного потока на вершине опоры так, чтобы исключить затенение датчиков элементами конструкции, были установлены измеритель скорости ветра (термоанемометр) и измеритель направления ветра (румбометр). Второй термоанемометр устанавливался на высоте 10 м на горизонтальной штанге из уголкового профиля длиной 750 мм, расположенной под углом 45° к грани опоры.

В процессе эксперимента при изменении направления ветра таким образом, что угол между штангой термоанемометра и набегающим потоком становился меньше 90°, термоанемометр переставлялся на противоположный пояс.

В качестве автономного источника электропитания использовался бензиновый генератор переменного тока, вырабатывающий напряжение 220 В и мощность 1 кВт·ч. Для снижения уровня шумов и наводки от передаваемого воздушной линией напряжения система мониторинга, персональный компьютер и генератор заземлялись.

В период проведения эксперимента система располагалась в легковом автомобиле. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 3.

Эксперимент проводился в два этапа. На первом этапе возбуждение колебаний сооружения достигалось при помощи ветра, на втором этапе фиксировались свободные колебания системы, которые создавались при помощи ручного резонанса.

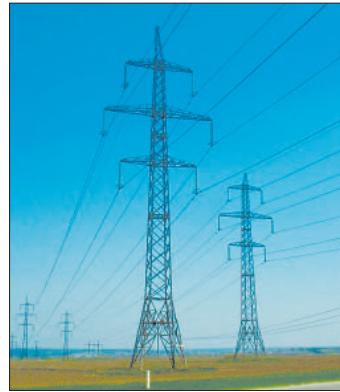
При проведении подобных исследований необходимо контролировать не только внутренние параметры конструкции (отклик), но и внешние воздействия, причем измерения необходимо производить синхронно с достаточно высокой частотой опроса первичных преобразователей и возможностью сбора значительного объема статистической информации [8, 9].

#### *Результаты экспериментальных исследований динамического поведения опор в ветровом потоке*

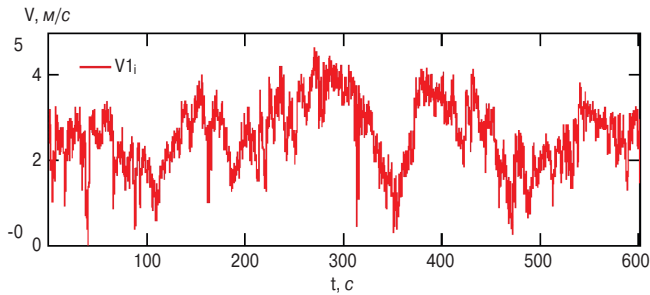
Первый этап эксперимента проводился в течение пяти дней. В общем было записано 57 ч реализаций выходных сигналов первичных преобразователей,



**Рис. 1.** Общий вид анкерно-угловой опоры ВЛ 220 кВ  
**Fig. 1.** General view of the anchor-corner support of 220 kV overhead line



**Рис. 2.** Общий вид промежуточной опоры ВЛ 220 кВ  
**Fig. 2.** General view of the 220 kV overhead line intermediate support



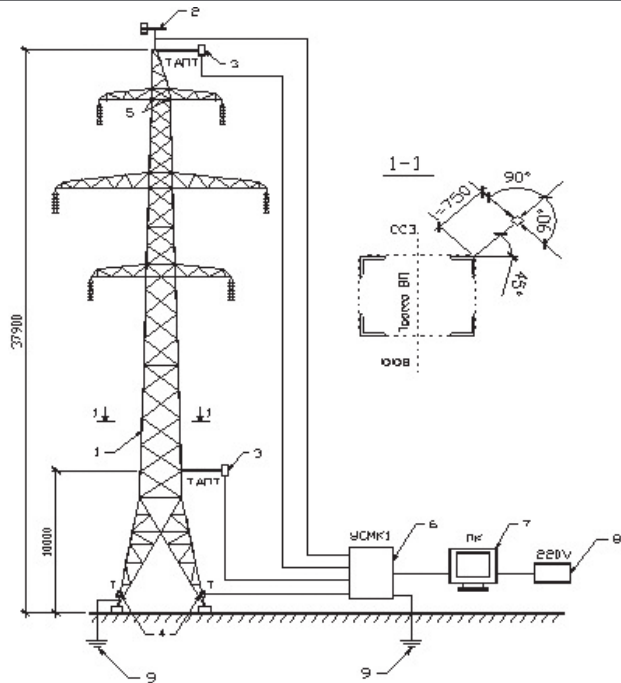
**Рис. 4.** Характерная реализация скорости ветра северо-западного направления  
**Fig. 4.** Characteristic realization of the wind speed of the northwest direction

из которых для анализа было отобрано 16 часовых реализаций. Опрос всех первичных преобразователей проводился с частотой 64 Гц.

В процессе проведения эксперимента зафиксированы два направления ветра СВВ и СЗ. По результатам замеров скорости ветра на высотах 10 и 37,9 м получены следующие отношения средних скоростей ветрового потока с интервалом осреднения 1 ч: для СВВ направления – 1,52; для СЗ направления – 1,67. Документ «Правила устройства электроустановок. Глава 2.5. Воздушные линии электропередачи напряжением свыше 1 кВ до 750 кВ» рекомендует в данном случае коэффициент 1,5. Таким образом, можно сделать вывод о соответствии реального измеренного профиля ветра нормативному значению.

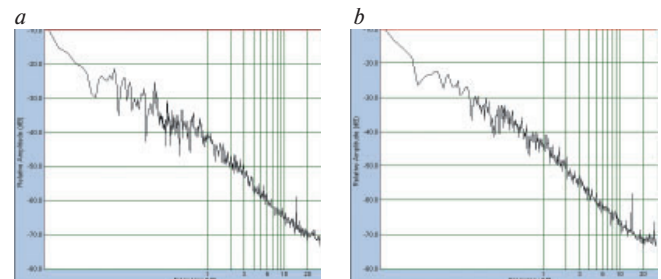
На рис. 4 приведена характерная реализация скорости ветра северо-западного направления. Средняя скорость с интервалом осреднения 1 ч составила 2,56 м/с; СКО – 0,788; интенсивность турбулентности  $I(t) = 0,307$ . Для ветра направления СВВ средняя скорость составила 3,42 м/с; СКО – 0,584;  $I(t) = 0,171$ .

Для определения собственных частот колебаний опоры ПБГ-4 полученные реализации случайного процесса преобразовывались при помощи быстрого преобразования Фурье [10, 11].



**Рис. 3.** Схема проведения экспериментального исследования: 1 – опора ПБГ-4; 2 – румбометр; 3 – термоанемометрический преобразователь (ТАПТ); 4 – тензорезисторы; 5 – вибродатчик ВЭИК; 6 – система мониторинга «УСМК-1»; 7 – персональный компьютер; 8 – бензиновый генератор; 9 – контур заземления

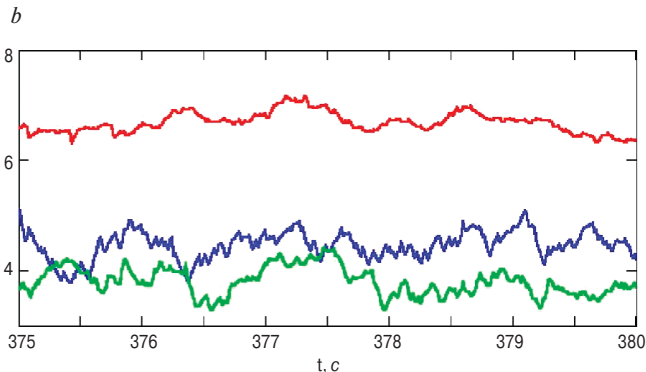
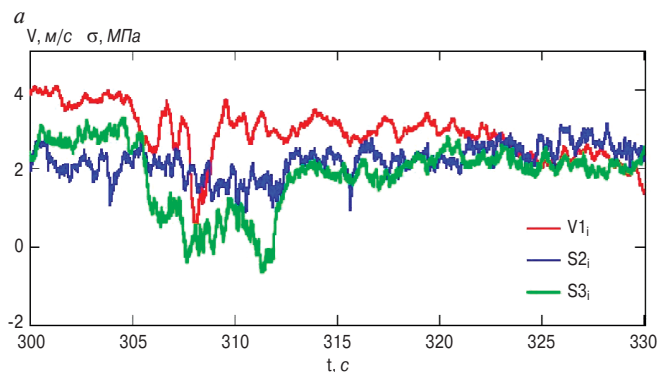
**Fig. 3.** The scheme of the experimental study: 1 – support PBG-4; 2 – rumbometer; 3 – thermoanemometric converter (TAPT); 4 – strain gauges; 5 – VEG vibration sensor; 6 – monitoring system «USMK-1»; 7 – personal computer; 8 – gasoline generator; 9 – ground loop



**Рис. 5.** Спектральные плотности ветра: а – СЗ; б – СВВ  
**Fig. 5.** Spectral densities of wind: a – NW; b – NE

Полученные спектры продольных пульсаций скорости ветра при северо-западном и северо-восточном направлениях ветра приведены на рис. 5. Анализ спектральных плотностей позволяет сделать вывод о стационарности ветрового процесса, так как данные спектры соответствуют классическим представлениям [12, 13].

На рис. 6 приведены характерные реализации полученных сигналов. На рисунке график  $V_1$  характеризует скорость ветра на высоте 10 м, м/с; графики S2 и S3 – напряжения в поясах, МПа. Для удаления различных шумов использовалась функция простой когерентности [14], показывающая совпадение спектров сигналов по частотам. Подобная функция, построенная для поясов наветренной грани (рис. 7), показывает практически полное совпадение спектров сигналов. На полосах частот от 0,85 до 7,5 Гц



**Рис. 6.** Характерные реализации полученных сигналов: а – приведены графики изменения напряжений в наветренных поясах при ветре перпендикулярно трассе ВЛ; б – приведены графики изменения напряжений в диагональных поясах при ветре вдоль ВЛ

**Fig. 6.** Typical implementations of the received signals: а – graphs of stress changes in windward belts with wind perpendicular to the overhead line route are given; б – graphs of stress changes in diagonal belts with wind along the overhead line are given

взаимная когерентность двух процессов превышает 0,9. Это свидетельствует о том, что основные частоты собственных колебаний находятся именно в данном интервале. Когерентность на низших частотах также превышает 0,9, однако данный факт связан с тем, что на частотах менее 0,1 Гц системы, у которых первые собственные значения находятся в диапазоне  $f \in [0,5; 8]$  Гц, воспринимают ветровую нагрузку как квазистатическую [16].

Совершенно другую картину можно получить для реализаций напряжений в диагонально расположенных поясах, на которых проявляются все собственные частоты колебаний, а шум пропадает из-за некоторой временной задержки в реакции противоположных поясов на ветровое воздействие (рис. 8).

Анализ рис. 5–8 позволил установить собственные частоты колебаний опоры. Первая собственная частота равна 1,09 Гц; вторая – 2,04 Гц; третья – 7,98 Гц. Частоты колебаний ниже 0,75 Гц на разных спектрах (рис. 5) проявляются по-разному и связаны с воздействием ветра на токоведущие провода.

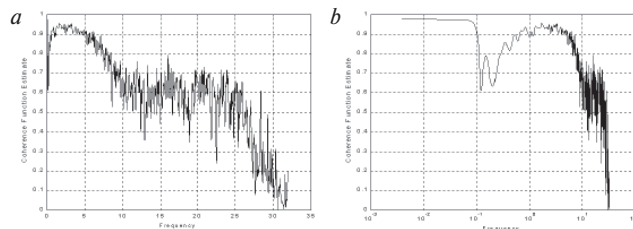
Для сопоставления спектров сигналов скорости ветра и отклика конструкции построены графики функции когерентности для направления ветра поперек линии (рис. 9).

В общем когерентность указанного процесса можно охарактеризовать как слабую [13, 14]. Получены некоторые пики в области собственных частот конструкции, однако их величина незначительна.

*Результаты экспериментальных исследований свободных колебаний системы «опора – провода»*

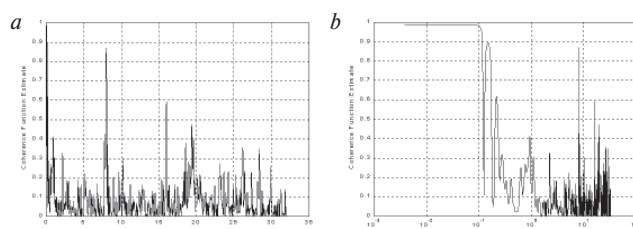
Второй этап эксперимента заключался в исследовании свободных колебаний системы «опора – провода». Возбуждение колебаний осуществлялось методом ручного резонанса. Вынуждающая сила прикладывалась в уровне крепления тросостойки к стволу анкерно-угловой опоры У-38м № 57 перпендикулярно трассе ВЛ.

Характерный график затухающих колебаний системы для анкерно-угловой опоры представлен на рис. 10.



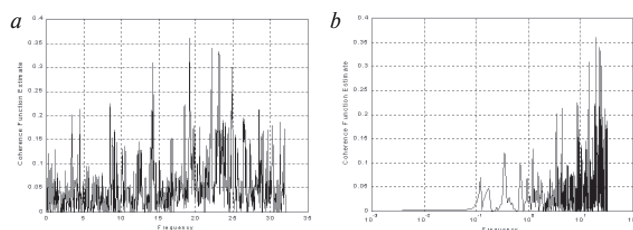
**Рис. 7.** Функция когерентности реализаций напряжений в поясах наветренной грани: а – линейный масштаб; б – логарифмический масштаб

**Fig. 7.** The coherence function of stress realizations in the windward face belts: а – linear scale; б – logarithmic scale



**Рис. 8.** Функция когерентности реализаций напряжений в диагональных поясах: а – линейный масштаб; б – логарифмический масштаб

**Fig. 8.** The coherence function of stress realizations in diagonal belts: а – linear scale; б – logarithmic scale



**Рис. 9.** Функция когерентности скорости ветра и отклика конструкции при направлении ветра поперек линии: а – линейный масштаб; б – логарифмический масштаб

**Fig. 9.** The coherence function of the wind speed and the response of the structure in the direction of the wind across the line: а – linear scale; б – logarithmic scale

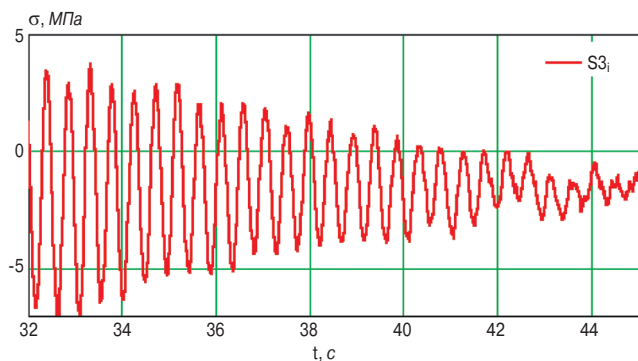


Рис. 10. График затухающих колебаний системы для анкерно-угловой опоры

Fig. 10. Graph of damped oscillations of the system for the anchor-angular support

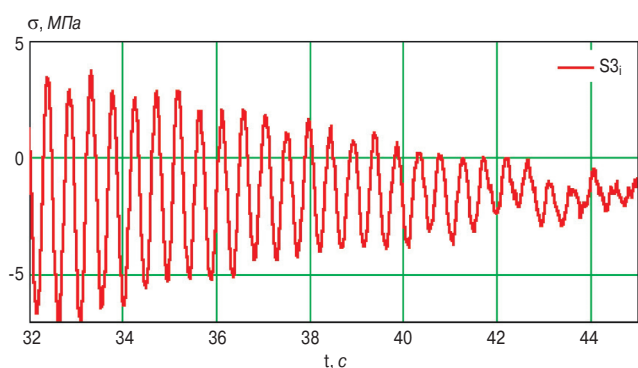


Рис. 12. График свободных затухающих колебаний системы «промежуточная опора – провода»

Fig. 12. Graph of free damped oscillations of the «intermediate support – wires» system

Вид графика позволяет сделать заключение о наличии нескольких частот, причем в первой трети являются доминирующими колебания конструкции опоры с частотой около 1 Гц, а на остальном промежутке реализации преобладающими являются колебания проводов с частотой 0,2 Гц. Причем затухание колебаний происходит при действии сухого (кулоновского) трения [14].

Для определения среднего значения логарифмического декремента колебаний используется формула [13, 14]:

$$\delta = \frac{\ln\left(\frac{A_0}{A_n}\right)}{n}, \quad (1)$$

где  $A_0, A_n$  – начальная и конечная амплитуды, разделенные  $n$  периодами свободных затухающих колебаний.

Для данной системы полученный подобным образом логарифмический декремент колебаний составляет 0,191 с дисперсией  $4 \cdot 10^{-4}$ .

Коэффициент внутреннего трения конструкции опоры ВЛ равен (2):

$$\xi = \frac{\delta}{\pi} = 0,04. \quad (2)$$

Преобразование реализаций сигналов при помощи БПФ позволили построить спектральные зависимости колебательного процесса (рис. 11). Собственные частоты, полученные в результате первого и второго этапов, достаточно хорошо согласуются.

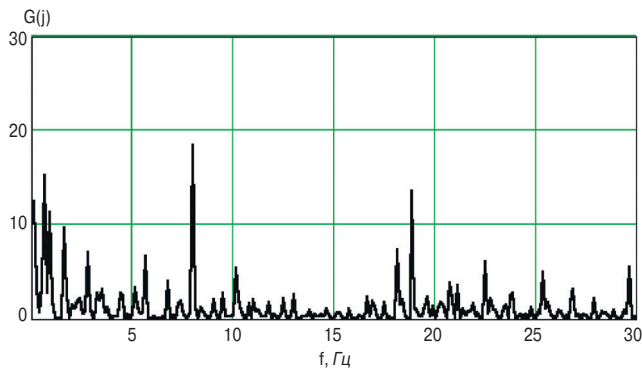


Рис. 11. Спектральная плотность колебаний системы «анкерная опора – провода» при свободных затухающих колебаниях

Fig. 11. Spectral density of oscillations of the «anchor support – wires» system with free-damping oscillations

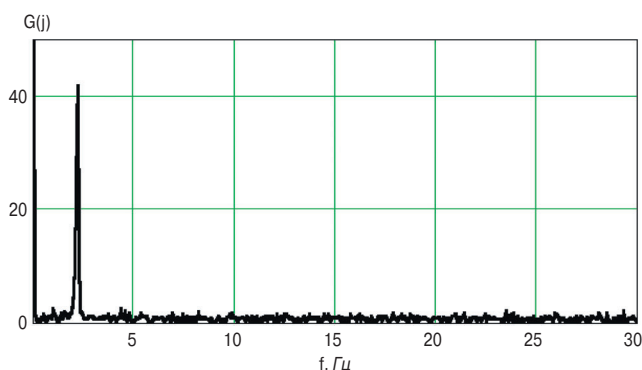


Рис. 13. Спектральная плотность колебаний системы «промежуточная опора – провода» при свободных затухающих колебаниях

Fig. 13. Spectral density of oscillations of the «intermediate support – wires» system with free-damping oscillations

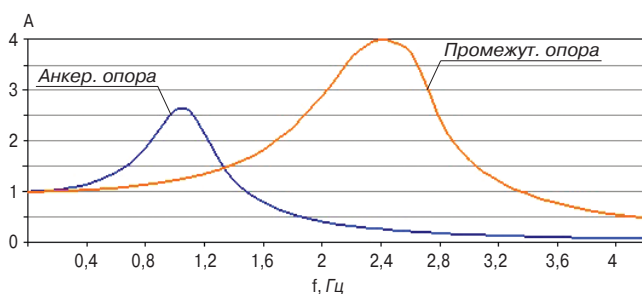


Рис. 14. Амплитудно-частотные характеристики опор

Fig. 14. Amplitude-frequency characteristics of the supports

Апробация данной методики также проводилась и на промежуточной опоре ПБГ-4 № 72 с глухими зажимами, принадлежащей ВЛ 220 кВ «Змиев ТЭС – Залютино».

Характерный график затухания свободных колебаний представлен на рис. 12, а построенная по данной реализации спектральная плотность – на рис. 13, на котором четко видна доминирующая первая собственная частота, равная 2,37 Гц. Причем данная частота сохранялась при изменении направления вынуждающей силы вдоль и перпендикулярно оси ВЛ. Логарифмический декремент затухания колебаний в данном случае равен 0,049, а коэффициент внутреннего трения конструкции – 0,016.

Амплитудно-частотные характеристики системы были получены при помощи выражения [19]:

$$A = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{F_p}{F_c}\right)^2\right)^2 + \left(2 \cdot \delta \cdot \left(\frac{F_p}{F_c}\right)^2\right)^2}}, \quad (3)$$

где  $F_p$  – частота вынуждающих колебаний;  $F_c$  – частота собственных колебаний.

Таким образом, при совпадении частот внешнего воздействия и собственных частот конструкции динамический коэффициент может составить 2,61 для анкерно-угловой опоры У-38м и 3,99 для промежуточной опоры ПБГ-4 (рис. 14).

### Выводы

Экспериментально определены первые три собственные частоты колебаний опоры ВЛ. Частоты ниже 0,75 Гц связаны с воздействием ветра на токоведущие провода.

Анализ результатов позволил уточнить, что ветер под углом 90° к трассе ВЛ оказывает не только максимальное статическое давление, но и почти в два раза более восприимчив рассмотренной системой «опора – провода» в динамике.

В результате проведения экспериментальных исследований установлена необходимость частотной отстройки конструкции опоры от собственной частоты 2,2 Гц, так как внешнее воздействие с данной частотой возможно при обрыве токоведущего провода в одной из фаз.

Представленная методика позволяет изучать динамические свойства и исследовать реакции конструкций на ветровые воздействия не только опор ВЛ, но также опор ветроэнергетических установок и антенных опор радиорелейной и сотовой связи.

### Список литературы / References

- Трофимов В.И. Исследование устойчивости и несущей способности металлических конструкций опор линий электропередачи. М.: АСВ, 2019. 320 с.
- Trofimov V.I. Issledovanie ustojchivosti i nesushhej sposobnosti metallicheskich konstrukcij opor linij elektroperedachi [Study of the stability and load-bearing capacity of metal structures such as power transmission towers]. Moscow: ASV. 2019. 320 p.
- Шевченко Е.В. Совершенствование металлических конструкций опор воздушных линий электропередачи. Makeevka: ДонНАСА, 2017. 123 с.
- Shevchenko E.V. Sovershenstvovanie metallicheskich konstrukcij opor vozdushnykh linij elektroperedachi [Improving metal structures of overhead power transmission line supports]. Makeevka: DonNASA. 2017. 123 p.
- Васылев В.Н. Исследование пространственной работы крестовой решетки при натуральных испыта-

- ниях опоры ВЛ на Полигоне ДонНАСА // *Металлические конструкции*. 2018. Т. 19. № 1. С. 15–25.
- Vasy`lev V.N. Issledovanie prostranstvennoj raboty krestovoj reshetki pri naturnykh ispytaniyakh opor VL na Poligone DonNASA. *Metallicheskie konstrukcii*. 2018. Vol. 19. No. 1, pp. 15–25. (In Russian).
- Крюков К.П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи. М.: Энергия, 2020. 312 с.
- Kryukov K.P. Konstrukcii i mekhanicheskij raschyot linij ehlektroperedachi [Structures and mechanical analysis of power lines] Moscow: Energiya. 2020. 312 p.
- Yang B., Dzikowich B. Stress, strain, and structural dynamics: an interactive handbook of formulas, solutions, and MATLAB toolboxes. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2005. V. 118 (6), pp. 3376–3387. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.2118987>
- Coşkun S.B. Advances in computational stability analysis. Rijeka: InTech. 2020. 132 p.
- Bazant Z.P. Stability of structures: elastic, inelastic, fracture, and damage theories. New York: Oxford University Press. 2020. 1011 p.
- Couneson P., Lamsoul J., Delplanque D. Improving the performance of existing high-voltage overhead lines by using compact phase and ground conductors. *CIGRE*. Vol. 12 (3). 2019, pp. 18–76.
- Танасогло А.В. Уточнение коэффициента динамичности анкерно-угловой опоры ВЛ 110 кВ при действии пульсационной составляющей ветровой нагрузки // *Металлические конструкции*. 2019. Т. 34. № 2. С. 135–145.
- Tanasoglo A.V. Utochnenie koehfficienta dinamichnosti ankerno-uglovoj opory VL 110 KV pri dejstvii pul'sacionnoj sostavlyayushchej vetrovoj nagruzki. *Metallicheskie konstrukcii*. 2019. Vol. 34. No. 2, pp. 135–145.
- Diana G., Bruni S., Cheli F., Fosatti F., Manetti A. Dynamic analysis of the transmission line crossing «Lago de Maracaibo». *Structures of Overhead Lines Journal*. 2007, pp. 1759–1766.
- Kemp A.R., Behneke R.H. Behaviour of cross-bracing in latticed towers. *Journal of Structural Engineering*. 2018. Vol. 124 (4). 2018, pp. 360–367. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2018\)124:4\(360\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2018)124:4(360))
- Box M.J., Davis D., Swann W.H. Nonlinear optimization techniques. Edinburgh: Oliver and Boyd. 2018. 60 p.
- Li H., Bai H. High-voltage transmission tower-line system subjected to disaster loads. *Progress in Natural Science*. 2016. Vol. 16 (9), pp. 899–911. DOI: <https://doi.org/10.1080/10020070612330087>
- Togbenou K., Li Y., Chen N., Liao H. An efficient simulation method for vertically distributed stochastic wind velocity field based on approximate piecewise wind spectrum. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2016. Vol. 151 (3), pp. 48–59. DOI: <https://doi.org/10.1155/2010/749578>



# КОМПОЗИТ-ЭКСПО

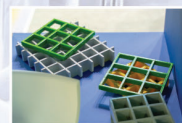
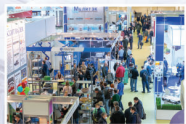
Шестнадцатая международная специализированная выставка

26 - 28 марта 2024

Москва, ЦВК «Экспоцентр», павильон 1

## Основные разделы выставки:

- Сырье для производства композитных материалов, компоненты: смолы, добавки, термопластики, углеродное волокно и т.д.
- Наполнители и модификаторы
- Стеклопластик, углепластик, графитопластик, базальтопластик, базальтовые волокна, древесно-полимерный композит (ДПК), т.д.
- Полуфабрикаты (препреги)
- Промышленные (готовые) изделия из композитных материалов
- Технологии производства композитных материалов со специальными и заданными свойствами
- Оборудование и технологическая оснастка для производства композитных материалов
- Инструмент для обработки композитных материалов
- Измерительное и испытательное оборудование
- Сертификация, технический регламент
- Компьютерное моделирование
- Утилизация



Специальный раздел выставки:  
**КЛЕИ И ГЕРМЕТИКИ**

## Информационная поддержка:



## Дирекция:

Выставочная Компания «Мир-Экспо»  
115230, Россия, Москва, Хлебозаводский проезд, дом 7, строение 10, офис 507  
Тел.: 8 495 988-1620 | E-mail: info@composite-expo.ru | Сайт: www.composite-expo.ru

**YouTube** youtube.com/user/compoexporussia **Twitter** @compoexporus **Telegram** @ocompo

## Организатор:



# ПОЛИУРЕТАНЭКС

Пятнадцатая международная специализированная выставка

26 - 28 марта 2024

Москва, ЦВК «Экспоцентр», павильон 1

## Основные разделы выставки:

- Сырье для производства полиуретанов (добавки, красители, катализаторы, наполнители, и т.д.)
- Оборудование и станки для производства и переработки полиуретанов (расходомерия, шестереночные, оседагональные (шнековые), шлепперные насосные установки, обрабатывающие станки, и т.д.)
- Конечная продукция (контактное уплотнение при литье, фильтры и т.д.)
- Услуги (лабораторные испытания, охрана здоровья и безопасность, переработка, защита окружающей среды, научные разработки)
- Техническое обслуживание оборудования
- Тестовое оборудование



Специальный раздел выставки:  
**КЛЕИ И ГЕРМЕТИКИ**

## Информационная поддержка:



## Дирекция:

Выставочная Компания «Мир-Экспо»  
115230, Россия, Москва, Хлебозаводский проезд, дом 7, строение 10, офис 507  
Тел.: 8 495 988-1620 | E-mail: info@polyurethanex.ru | Сайт: www.polyurethanex.ru

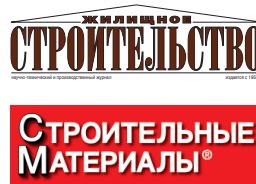
**YouTube** youtube.com/user/polyexporu **Twitter** @polyexporus **Telegram** @ocompo

## Организатор:





Комитет Торгово-промышленной палаты РФ  
по предпринимательству в сфере строительства  
АО «ЦНИИЭП жилища – институт комплексного проектирования  
жилых и общественных зданий» (АО «ЦНИИЭП жилища»)  
Объединенная редакция научно-технических журналов  
«Жилищное строительство» и «Строительные материалы»®



# XIV Международная научно-практическая конференция «InterConPan-2024: инновации для индустриального домостроения»

## InterConPan-2024

International Conference of Large-panel Construction

16-17 апреля 2024 г.

г. Хабаровск  
Отель «Интурист» (Амурский бульвар, 2)

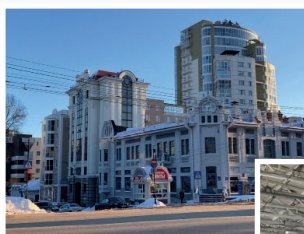
### ПРОГРАММА:

#### 1-й день

Пленарное заседание

Секции:

«Архитектура индустриальных зданий  
и комплексное развитие территорий»;  
«Инновационная технология  
предприятий индустриального  
домостроения»



#### 2-й день

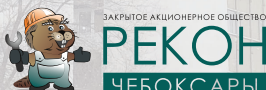
Выездная сессия

- Завод ЖБИ «АмурСтройМеханизация» (реконструкция действующего производства)
- Завод КПД «Прогресс» (реконструкция действующего производства)
- ЗЖБИ «Сахалин-Инжиниринг» (строительство нового предприятия)
- ЖК «Берёзки», ЖК «Нордик» (Хабаровск)

### ТЕМАТИКА:

- Оборудование и технологии для обеспечения технологического суверенитета индустриального домостроения
- Инновационные строительные системы
- BIM-технологии в сборном домостроении
- Современные инновационные строительные материалы
- Архитектура и планировочные решения
- Малоэтажное индустриальное строительство
- Инновационная организация строительного производства
- Комплексное развитие территорий застройки

Генеральный спонсор



[WWW.REKON-SMK.RU](http://WWW.REKON-SMK.RU)

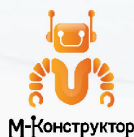
[WWW.REKON-TECH.RU](http://WWW.REKON-TECH.RU)

Постоянный партнер

**PBS**

Petro Building Systems

Партнеры



[www.interconpan.ru](http://www.interconpan.ru)

Организационный комитет: +7 (499) 390-87-17

[kpd-conf@mail.ru](mailto:kpd-conf@mail.ru);

[mail@rifsm.ru](mailto:mail@rifsm.ru)

[www.rifsm.ru](http://www.rifsm.ru)