

ISSN ONLINE 2782-1919

**УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ  
В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**  
SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION



**СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК**  
**Научно-практический форум**  
**SMARTBUILD-2023**  
**«СТРОЙКА ПОЛИТЕХА»**  
**с международным участием**

**Том 4**

**4**

**2023** VOL. 4  
ISSUE 4

ИЗДАНИЕ ЯРОСЛАВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

# **УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 2020 года, выходит 4 раза в год

Включен в апреле 2023 года в Перечень ВАК РФ

**Том 4  
Выпуск 4**

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК  
Научно-практический форум  
SMARTBUILD-2023  
«СТРОЙКА ПОЛИТЕХА»  
с международным участием

**Ярославль 2023**

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ»

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Главный редактор:	С.В. ФЕДОСОВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва)
Заместитель главного редактора:	П.Б. РАЗГОВОРОВ (д.т.н., проф., Ярославль)
Ответственный секретарь:	В.Б. ДОРОНИНА

## МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А.А. АБДЫКАЛЫКОВ (д.т.н., проф., Кыргызстан, Бишкек), П.А. АКИМОВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), М.О. БАКАНОВ (советник РААСН, д.т.н., доц., Иваново), В.В. БЕЛОВ (советник РААСН, д.т.н., проф., Тверь), А.М. БЕЛОСТОЦКИЙ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), Н.И. ВАТИН (советник РААСН, д.т.н., проф., Санкт-Петербург), В.М. ГОТОВЦЕВ (д.т.н., проф., Ярославль), А.В. ЗАХАРОВ (советник РААСН, к. архитектуры, проф., Иваново), А.Б. КАПРАНОВА (д.ф.-м.н., проф., Ярославль), В.И. КОЛЧУНОВ (академик РААСН, д.т.н., проф., Москва), В.Г. КОТЛОВ (советник РААСН, д.т.н., проф., Йошкар-Ола), Н.Н. КУДРЯШОВ (к. архитектуры, проф., Ярославль), А.Е. ЛЕБЕДЕВ (д.т.н., доц., Ярославль), С.Н. ЛЕОНОВИЧ (иностранный акад. РААСН, д.т.н., проф., Республика Беларусь, Минск), В.Л. МОНДРУС (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Москва), А.И. МОХОВ (акад. РАЕН, д.т.н., проф., Москва), Т.А. НИЗИНА (советник РААСН, д.т.н., проф., Саранск), П.И. ПОСПЕЛОВ (д.т.н., проф., Москва), Ю.В. ПУХАРЕНКО (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Санкт-Петербург), С.П. РУДОБАШТА (д.т.н., проф., Москва), В.Е. РУМЯНЦЕВА (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Иваново), В.П. СЕЛЯЕВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Саранск), М.Ю. ТАРШИС (д.т.н., доц., Ярославль), В.И. ТРАВУШ (вице-президент РААСН, акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), А.А. ТРЕЩЕВ (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Тула), В.Н. ФЕДОСЕЕВ (советник РААСН, д.т.н., проф., Иваново), RADIVOJE MITROVIĆ (PhD по техн. н., проф., Республика Сербия, Белград)

Учредитель	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный технический университет»
Адрес редакции:	150023, Россия, г. Ярославль, Московский проспект, 88
Телефон	+7 (4852) 44-12-70
E-mail	razgovorovpb@ystu.ru
Электронный адрес	<a href="http://comincon.ru">http://comincon.ru</a>

Журнал издается при содействии Российской Академии архитектуры и строительных наук

Редакторы:	М.А. Канакотина, О.С. Полагина, О.А. Юрасова
Англ. перевод:	Л.А. Тюкина
Компьютерная верстка:	А.С. Фролов
Корректор:	О.А. Юрасова

Зарегистрирован	27 ноября 2020 (Свидетельство ЭЛ № ФС 77 - 79733)
Периодичность:	4 раза в год
Подписка и распространение	Свободный доступ

PUBLISHED BY YAROSLAVL STATE TECHNICAL UNIVERSITY

# **SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION**

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Established in November 2020, published quarterly

Included in April 2023 in the List of the Higher Attestation Commission  
of the Russian Federation

**Volume 4  
Issue 4**

SPECIAL ISSUE  
Scientific and practical forum  
with international participation  
SMARTBUILD-2023  
“STROYKA POLITEKHA”

**Yaroslavl 2023**

# SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

## SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION

### EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief:	S.V. FEDOSOV (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow)
Deputy Editor-in-Chief:	P.B. RAZGOVOROV (doc.eng.sc., prof., Yaroslavl)
Executive secretary:	V.B. DORONINA

### INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

A.A. ABDYKALYKOV (doc.eng.sc., prof., Kyrgyzstan, Bishkek), P.A. AKIMOV (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), M.O. BAKANOV (adv. RAACS, doc.eng.sc., doc., Ivanovo) V.V. BELOV (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Tver), A.M. BELOSTOTSKIY (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), N.I. VATIN (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Saint-Petersburg), V.M. GOTOVTSEV (doc.eng.sc., prof., Yaroslavl), A.V. ZAKHAROV (adv. RAACS, cand. arch., prof., Ivanovo), A.B. KAPRANOVA (doc. phys. and math. sc., prof., Yaroslavl), V.I. KOLCHUNOV (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), V.G. KOTLOV (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Yoshkar-Ola), N.N. KUDRYASHOV (cand. arch., prof., Yaroslavl), A.E. LEBEDEV (doc.eng.sc., doc., Yaroslavl), S.N. LEONOVICH (for. acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Belarus, Minsk), V.L. MONDRUS (corr. memb. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), A.I. MOKHOV (acad. RANS, doc.eng.sc., prof., Moscow), T.A. NIZINA (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Saransk), P.I. POSPELOV (doc.eng.sc., prof., Moscow), Yu.V. PUKHARENKO (corr. memb. RAACS, doc.eng.sc., prof., Saint-Petersburg), S.P. RUDOBASHTA (doc.eng.sc., prof., Moscow), V.E. RUMYANTSEVA (corr. memb. RAACS, doc.eng.sc., prof., Ivanovo), V.P. SELYAEV (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Saransk), M.Yu. TARSHIS (doc.eng.sc., doc., Yaroslavl), V.I. TRAVUSH (Vice Pres. RAACS, acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), A.A. TRESHCHEV (corr. memb. RAACS, doc.eng.sc., prof., Tula), V.N. FEDOSEEV (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Ivanovo), RADIVOJE MITROVIĆ (PhD eng.sc., prof., Serbia, Belgrade)

Founder:	Yaroslavl State Technical University
Editorial office address	88, Moskovsky Prosp., Yaroslavl, 150023, Russia
Telephone	+7 (4852) 44-12-70
E-mail	razgovorovpb@ystu.ru
Website	<a href="http://comincon.ru">http://comincon.ru</a>

Published with the assistance of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences

Editors:	M.A. Kanakotina, O.S. Polagina, O.A. Yurasova
English translator:	L.A. Tyukina
Layout designer:	A.S. Frolov
Proofreader:	O.A. Yurasova
Registration	27 November 2020 (Certificate EL No FS 77 - 79733)
Frequency:	Quarterly
Subscription and distribution	Open Access

## СОДЕРЖАНИЕ / TABLE OF CONTENTS

### Строительные конструкции, здания и сооружения

- 8 С.А. Тумаков, Г.Н. Голубь  
Оценка несущей способности железобетонной плиты пола цеха на армированном грунтовом основании
- 20 S.A. Tumakov, G.N. Golub  
Assessment of the load-bearing capacity of the existing reinforced concrete floor slab of the workshop on a reinforced soil foundation
- S.V. Fedosov, V.N. Fedoseev, I.A. Zaitseva, P.B. Razgovorov, V.A. Voronov  
Design of buildings with energy-efficient structures from the perspective of life cycle management of the construction object
- С.В. Федосов, В.Н. Федосеев, И.А. Зайцева, П.Б. Разговоров, В.А. Воронов  
Проектирование зданий с энергосберегающими конструкциями с позиций управления жизненного цикла объекта строительства

### Строительные материалы и изделия

- 30 А.А. Игнатьев, В.М. Готовцев, П.Б. Разговоров  
Градиентная модель адгезии жидкости на поверхности строительного материала
- А.А. Ignatyev, V.M. Gotovtsev, P.B. Razgovorov  
Gradient model of liquid adhesion on the building material surface
- 50 Л.А. Опарина, В.А. Огурцов  
Учет энергоемкости строительных материалов в течение жизненного цикла объектов капитального строительства
- Л.А. Oparina, V.A. Ogurtsov  
Consideration of construction materials energy intensity during the capital construction objects life cycle

**Архитектура зданий и сооружений.  
Творческие концепции архитектурной деятельности**

- 61 *О.Н. Чеберева, Е.Ю. Стрельникова*  
Архитектурный опыт формирования групп помещений ресурсного назначения в школах обучения детей с расстройством аутистического спектра
- O.N. Chebereva, E.Yu. Strelnikova*  
Architectural experience of creating groups of resource rooms in schools for children with autism spectrum disorder
- 75 *М.Н. Кюребекова*  
Семиотическое пространство ворот в архитектуре Дербента
- M.N. Kyurebekova*  
Semiotic gate space in the architecture of Derbent
- 89 *С.В. Расторгуев*  
Доступная Арктика
- S.V. Rastorguev*  
Accessible Arctic
- 106 Информация для авторов



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.01

# Оценка несущей способности железобетонной плиты пола цеха на армированном грунтовом ОСНОВАНИИ

**С.А. Тумаков, Г.Н. Голубь\***

**Сергей Анатольевич Тумаков, Григорий Николаевич Голубь**

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

*sergtum1958@yandex.ru, golubgn@ystu.ru\**



*Предложен метод расчета конструкции пола производственного здания на компенсационной грунтовой подушке по основанию, армированному вертикальными элементами. Основание представлено слабыми грунтами и усилено забивными железобетонными сваями. Компенсационная подушка выполнена из песчаных грунтов, уплотненных до требуемого модуля деформации. Расчет выполнен численным методом в программном комплексе SCAD. Получена информация по напряженно-деформированному состоянию свай, грунта подушки и плиты пола. Проведена проверка грунта компенсационной подушки на выполнение условий прочности по А.И. Боткину. Определена возможность эксплуатации железобетонной плиты пола производственного здания.*

**Ключевые слова:** компенсационная грунтовая подушка, вертикальное армирование основания, плита пола, сваи, предельное состояние, численные методы

**Для цитирования:**

Тумаков С.А., Голубь Г.Н. Оценка несущей способности железобетонной плиты пола цеха на армированном грунтовом основании // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 4. С. 8-19. URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4_2023)



SCIENTIFIC ARTICLE

# Assessment of the load-bearing capacity of the existing reinforced concrete floor slab of the workshop on a reinforced soil foundation

**S.A. Tumakov, G.N. Golub\***

**Sergey A. Tumakov, Grigoriy N. Golub**

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

*sergtum1958@yandex.ru, golubgn@ystu.ru\**



*A method for calculating the floor structure of an industrial building on a compensatory soil cushion on a base reinforced with vertical elements is considered. The foundation is composed of weak soils and reinforced with driven reinforced concrete piles. The compensation cushion is made of sandy soils compacted to the required deformation modulus. The calculation was performed using the numerical method in the SCAD software package. Information was obtained on the stress-strain state of piles, pad soil and floor slab. The soil of the compensation cushion was tested to meet the strength conditions of A.I. Botkin. The possibility of using a reinforced concrete floor slab of an industrial building has been determined.*

**Keywords:** compensatory soil cushion, vertical reinforcement of the base, floor slab, piles, limit state, numerical methods

**For citation:**

Tumakov, S.A. & Golub, G.N. (2023) Assessment of the load-bearing capacity of the existing reinforced concrete floor slab of the workshop on a reinforced soil foundation for new design loads, *Smart Composite in Construction*, 4(4), pp. 8-19 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4_2023)



## ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния железобетонной плиты пола существующего производственного цеха и изучению ее несущей способности на новые проектные нагрузки. Особенностью рассматриваемой конструкции является размещение на компенсационной подушке из слоя уплотненного песчаного грунта. Подушка, в свою очередь, устроена по грунтовому основанию, армированному вертикальными элементами.

На текущий момент инженерные методы расчета, учитывающие взаимодействие армирующих свай с окружающим грунтом, разработаны недостаточно полно. Нормативные документы СП 22.13330.2016 и СП 24.13330.2021 содержат, в основном, расчетные положения по предварительному вычислению деформаций армированных оснований, а окончательные расчеты, в том числе – по первой группе предельных состояний, предписывают выполнять численными методами. Так, в технической [1, 2] и научной литературе [3-7] расчет оснований, армированных вертикальными элементами, рассмотрен достаточно подробно. Численные методы совместного расчета зданий и армированных вертикальными элементами грунтовых оснований даны в [8-13], в том числе – с использованием программных средств Plaxis, Ansys, Лира, базирующихся на методе конечных элементов.

Объектом исследования является строительство зданий и сооружений на слабых грунтовых основаниях. Предметом исследования является напряженно-деформированное состояние конструкций на слабых грунтовых основаниях, армированных вертикальными элементами.

Цель работы – определение возможности эксплуатации железобетонных плит пола сооружения на слабом грунтовом основании, укрепленном путем армирования вертикальными элементами.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

При выполнении практической работы по техническому переоснащению производственного цеха в г. Ростове (Ярославская обл.) было установлено, что здание цеха выполнено с железобетонными колоннами, металлическими несущими конструкциями покрытия, со свайными фундаментами и железобетонными полами на грунтовой компенсирующей подушке по грунтовому основанию, армированному вертикальными железобетонными сваями. В задачу практической исследовательской работы входило определить достаточность несущей способности железобетонной плиты пола на новые нагрузки.

При исследовании существующего здания цеха, его конструкций, основания и анализе исполнительной документации было установлено, что железобетонная плита пола толщиной 250 мм изготовлена из бетона класса В25 и армирована верхней и нижней арматурой класса А400 диаметром 12 мм (ячейка 150x150 мм). Защитные слои бетона – 3 см; толщина грунтовой компенсирующей подушки – 1.6 м. Подушка из грунта с углом внутреннего трения не ниже 35 град. уплотнена до  $E = 30$  МПа. Армирующие вертикальные элементы представлены сваями длиной 10 м и сечением 0.3x0.3 м, с сеткой 2.4x2.5 м. Несущая способность сваи – 510 кН. Разрез здания показан на рис. 1.

В свою очередь, фрагмент схемы расположения свай под компенсирующей грунтовой подушкой приведен на рис. 2.

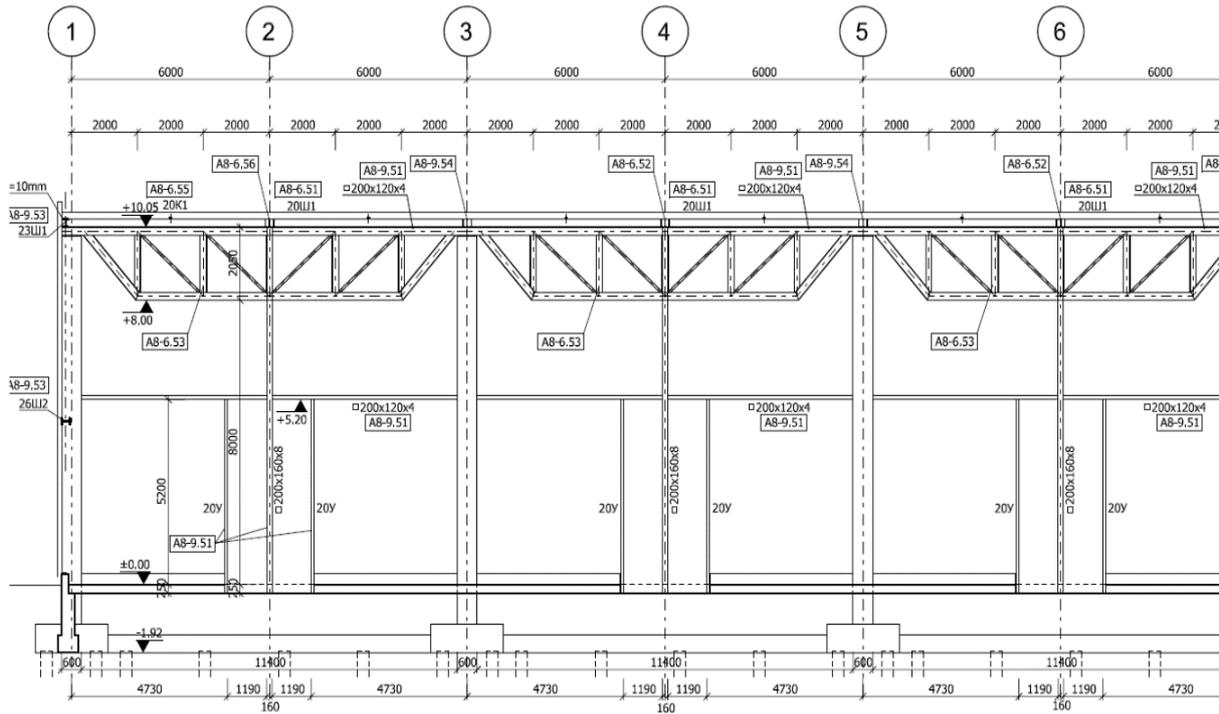
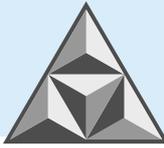


Рис. 1. Разрез. Несущие конструкции цеха. Грунтовая компенсирующая подушка. Свайные фундаменты.

Усиление основания пола армированием вертикальными элементами (сваями)

Fig. 1. Section. Bearing structures of the workshop. Ground compensating bedding. Pile foundations.

Reinforcement of the floor base by reinforcing with vertical elements (piles)

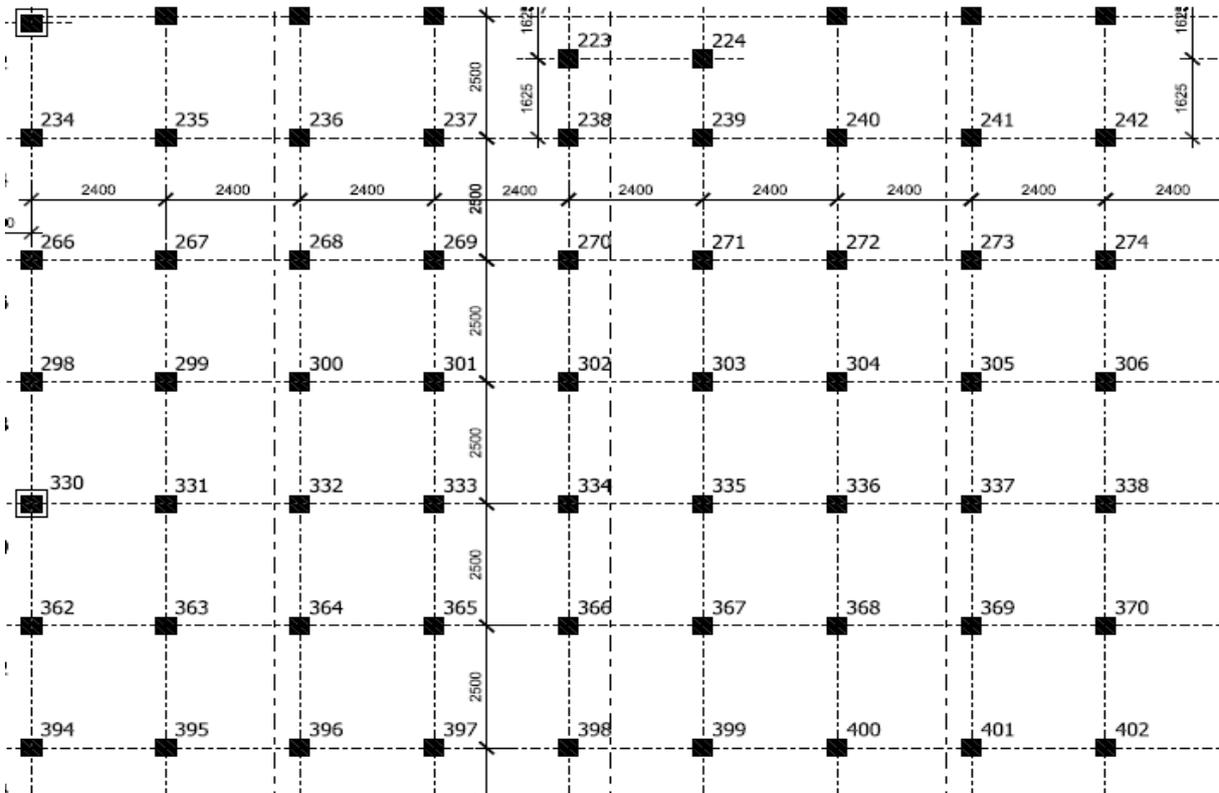


Рис. 2. Схема расположения армирующих элементов (свай)

Fig. 2. Layout of reinforcing elements (piles)



В современном строительстве армирование грунтового основания вертикальными элементами применяется довольно часто. Такое техническое решение представляет собой комбинацию грунта и армирующих элементов. В качестве армирующих элементов применяются готовые и буровые железобетонные и бетонные сваи с включением цемента, песков или щебня. Вертикальное армирование используется для улучшения свойств оснований, имеющих в своем составе слабые грунты, а также снижения деформаций как самого сооружения, строящегося на армированном основании, так и окружающей застройки при возведении здания в непосредственной близости от существующих зданий. Отличительной чертой армированного основания от свайного является то, что нагрузка на него передается через компенсирующую грунтовую подушку. Это позволяет использовать несущую способность грунтового основания в полном объеме и, в случае строительства в сейсмоопасных районах, избежать передачи значительных горизонтальных воздействий на армирующие элементы.

Для определения достаточности несущей способности железобетонной плиты пола на новые нагрузки применяли пакет SCAD Office 21, лицензия № 12447. Моделирование плиты пола на армированном сваями основании осуществлено в соответствии с п. 7.5 СП 24.13330.2021. Оценка усилий и проверка армирования железобетонной плиты пола проведены на ЭВМ с описанием взаимодействий плита – компенсирующая грунтовая подушка – армированное основание. Расчетная модель конструкции плиты пола выполнена из оболочечных элементов, лежащих на компенсационной грунтовой подушке. Подушка моделирована объемными элементами с опиранием на грунтовое основание, армированное железобетонными сваями. Грунтовое основание под компенсирующей грунтовой подушкой в модели учтено введением коэффициентов постели у оболочечных «фиктивных» элементов предельно малой толщины, связанных в узлах с объемными элементами, моделирующими компенсирующую подушку. Сваи в расчетной модели заданы как пространственные стержни, опирающиеся острием на упругую связь. Упругая связь под острием сваи моделирована конечным элементом КЭ-51. При расчете рассматривалось только действие вертикальных нагрузок.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Жесткость связи под острием сваи при действии только вертикальных нагрузок вычислена вручную по соотношению нагрузка/осадка  $R_z = N/s$ , где  $N$  – нагрузка на сваю;  $s$  – осадка, определенная в соответствии с СП 24.13330.2021 для отдельной сваи с номером  $i$ , с учетом влияния соседних свай, по формуле

$$s = \beta \frac{N_i}{G_{1l}} + \sum_{j \neq i} \delta_{ij} \frac{N_j}{G_{1l}}, \quad (1)$$

где первое слагаемое – осадка одиночной сваи с номером  $i$ ;  $\delta_{ij}$  – коэффициенты влияния, рассчитываемые в зависимости от расстояния между  $i$ - и  $j$ -сваями;  $N_{i(j)}$  – нагрузка на  $i(j)$ -сваю.

Геологические условия осуществления строительства рассмотрены по результатам двух отчетов об инженерно-геологических изысканиях 2009 и 2019 годов. На рис. 3 показаны условия по отчету 2009 г.

Характеристики грунтов приведены в табл. 1.

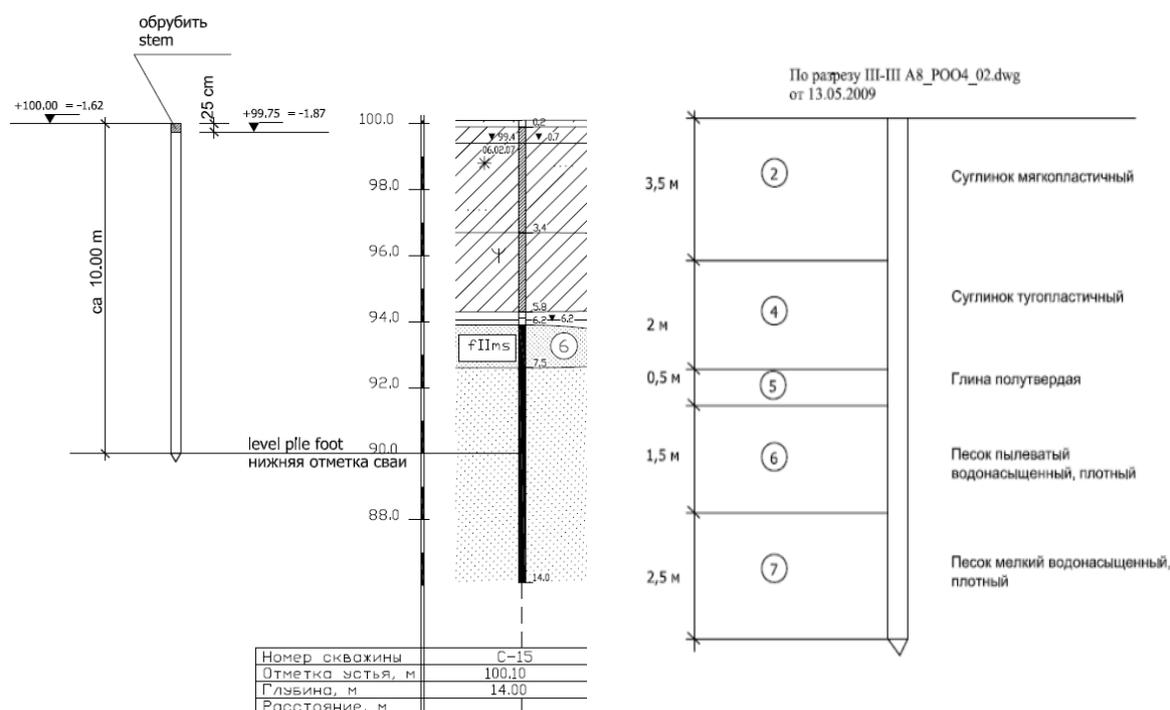


Рис. 3. Геологические условия площадки

Fig. 3. Geological site conditions

Таблица 1. Характеристики грунтов

Table 1. Soil characteristics

Наименование, номер слоя	$E$ , МПа	$\nu$	$h_i$ , м
Суглинок мягкопластичный, № 2	7	0.35	3.5
Суглинок тугопластичный, № 4	7	0.30	2.0
Глина полутвердая, № 5	10	0.36	0.5
Песок пылеватый водонасыщенный, плотный, № 6	28	0.34	1.5
Песок мелкий водонасыщенный, плотный, № 7	38	0.30	2.5

Коэффициенты  $\beta$  и  $\delta$  зависят от неизменяемых характеристик грунта, геометрических параметров сваи и модуля ее упругости. В пределах вычисленного расстояния влияния 4.34 м они равны:  $\beta = 0.691$ ,  $\delta_1 = 0.094$ ,  $\delta_2 = 0.035$ ,  $G_1 = 6.85$  МПа.

На рис. 4 показана модель плиты железобетонного пола на компенсационной грунтовой подушке и грунтовом основании с армированием железобетонными сваями (нагрузки показаны только от оборудования).

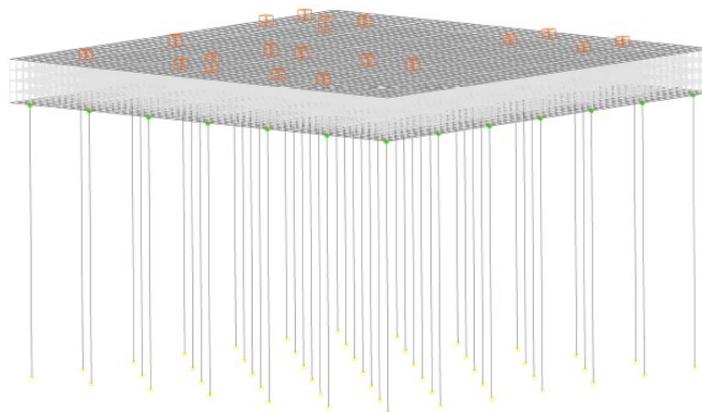
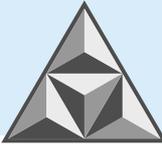


Рис. 4. Модель железобетонного пола на компенсационной грунтовой подушке и грунтовом основании с армированием железобетонными сваями (нагрузки показаны только от оборудования)

Fig. 4. Model of reinforced concrete floor on a compensating ground bed on a ground base reinforced with reinforced concrete piles (loads shown are from equipment only)



При выполнении расчетов использован стандартный итерационный метод по выравниванию давлений на грунт основания и деформаций грунта основания под компенсирующей подушкой обменом данных между расчетным модулем SCAD и сателлитом Кросс. Первоначально нагрузка на сваи была принята по грузовой площади. В последующих итерациях усилия в сваях принимались по результатам расчета. Поскольку усилия в сваях при выполнении этих итераций также менялись, жесткость связи КЭ-51 пересчитывалась вручную. Связь между узлом конечного элемента сваи и узлами объемных элементов компенсирующей подушки осуществлена при помощи абсолютно жесткого тела «паука». На каждой итерации контролировались усилия в сваях. Установлено, что при новых проектных нагрузках с учетом собственного веса конструкций и оборудования эти усилия были намного меньше несущей способности свай. Максимальное усилие на последней итерации зафиксировано для сваи элемента с номером 3986 (рис. 5):  $N = 152 \text{ кН} \ll Fd = 510 \text{ кН}$ . При этом вертикальная деформация острия сваи составила 2.7 мм; жесткость связи КЭ-51  $Rz = 58500 \text{ кН} \cdot \text{м}^{-1}$ .

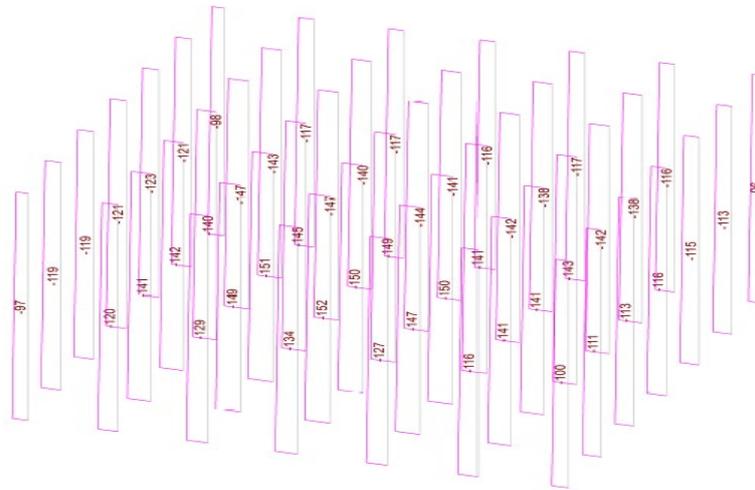


Рис. 5. Усилия  $N$  в элементах свай, кН

Fig. 5.  $N$  forces in pile elements, kN

Произведена проверка предельного состояния грунтовой компенсирующей подушки по условию А.И. Боткина [14] для сложного напряженного состояния

$$\tau_{\text{окт}} = \text{tg} \varphi \cdot \sigma_{\text{окт}}, \quad (2)$$

$$\text{где } \sigma_{\text{окт}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \text{ и } \tau_{\text{окт}} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (3)$$

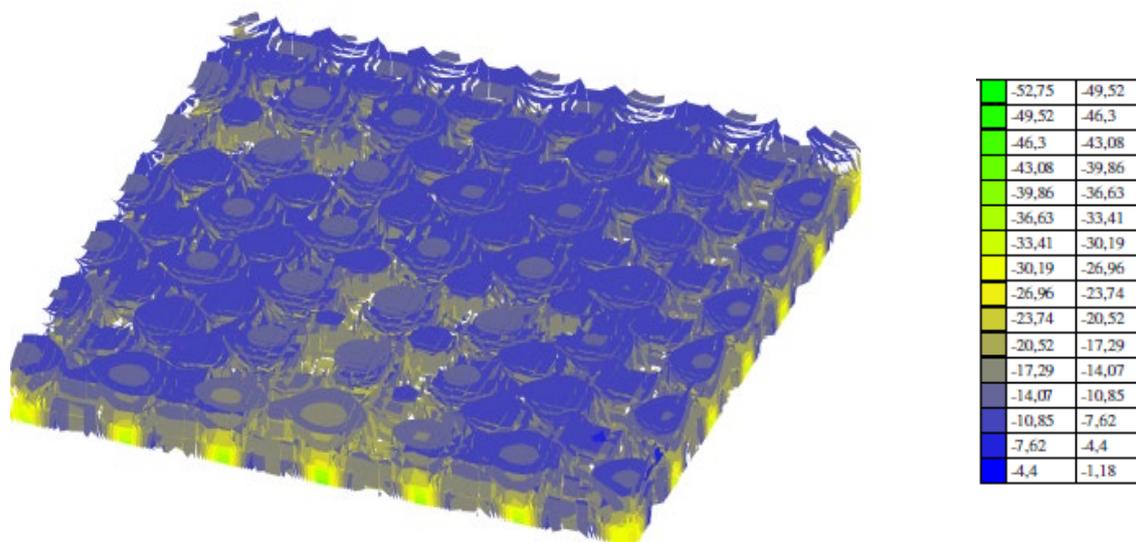
В процессе проверки не выявлены элементы грунтовой компенсирующей подушки, для которых было достигнуто предельное состояние. Покажем для некоторых элементов с экстремальными тензорами главных напряжений выполнение условия. Элемент с номером 1023: получен тензор главных напряжений  $\sigma_1 = 17.7 \text{ кПа}$ ,  $\sigma_2 = 23.6 \text{ кПа}$  и  $\sigma_3 = 66.6 \text{ кПа}$ ; предельное состояние не достигается:

$$\tau_{\text{окт}} = 21.8 \text{ кПа} < \text{tg} \varphi \cdot \sigma_{\text{окт}} = 25.2 \text{ кПа}.$$

Элемент с номером 8846: получен тензор главных напряжений  $\sigma_1 = 25.7 \text{ кПа}$ ,  $\sigma_2 = 28.1 \text{ кПа}$  и  $\sigma_3 = 86.0 \text{ кПа}$ ; предельное состояние не достигается:

$$\tau_{\text{окт}} = 27.8 \text{ кПа} < \text{tg} \varphi \cdot \sigma_{\text{окт}} = 32.6 \text{ кПа}.$$

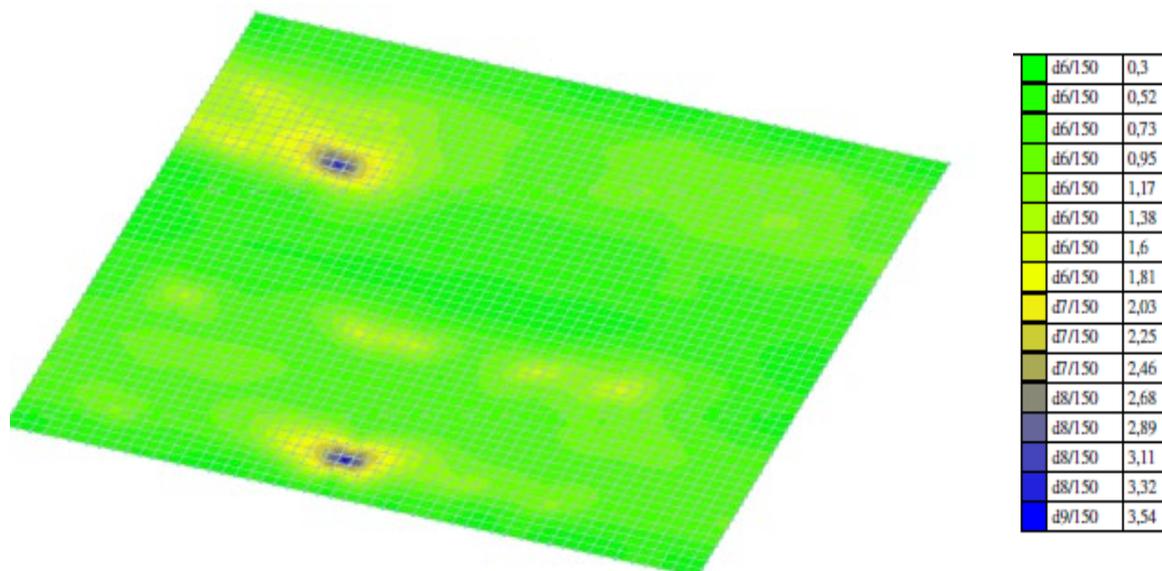
В качестве примера на рис. 6 показано распределение главных напряжений  $\sigma_1$  в грунтовой компенсирующей подушке.



**Рис. 6.** Главные напряжения  $\sigma$  в грунтовой компенсирующей подушке, кПа

**Fig. 6.** Major stresses  $\sigma$  in the ground compensating bed, kPa

В результате расчета получены размеры требуемого армирования железобетонной плиты пола цеха на новые проектные нагрузки. В качестве примера на рис. 7 показано требуемое нижнее армирование по оси ординат. Установлено, что при заданном шаге верхней и нижней арматуры 150 мм, соответствующем фактическому шагу установленной арматуры в плите, максимальный диаметр требуемой арматуры не превышает 9 мм.



**Рис. 7.** Требуемая арматура нижняя по оси ординат

**Fig. 7.** Required bottom reinforcement on Y-axis

Таким образом, можно считать обеспеченной несущую способность железобетонной плиты пола цеха, армированной верхней и нижней арматурой диаметром 12 мм, установленной с шагом 150 мм. При проведении натурных изысканий установлены фактические характеристики материалов и конструкций; проанализированы схемы расстановки оборудования и определены новые проектные нагрузки по плану технического перевооружения цеха.



## ВЫВОДЫ

Предложена методика расчета железобетонной плиты пола цеха с учетом наличия компенсирующей грунтовой подушки на армированном железобетонными сваями грунтовым основании.

В программном комплексе SCAD Office 21 замоделирована рассчитываемая конструкция и выполнен расчет, на основании анализа которого сделан вывод об обеспечении требуемой несущей способности железобетонной плиты пола цеха, армированной верхней и нижней арматурой диаметром 12 мм, на новые проектные нагрузки.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Горбунов-Посадов М.И., Ильичев В.А., Крутов В.И.** Основания, фундаменты и подземные сооружения: Справочник проектировщика. М.: Стройиздат, 1985. 479 с.
2. **Paul Teng T.** An introduction to the deep mixing methods as used in geotechnical application: Tech Report // US Department of transportation, federal highway administration: [сайт]. 2000. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/99138/99138.pdf>
3. **Федоровский В.Г., Безволев С.Г.** Метод расчета свайных полей и других вертикально армированных грунтовых массивов // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 1994. № 3. С. 11-15.
4. **Попов А.О.** Расчет конечной осадки глинистых оснований, армированных вертикальными элементами // *Инженерно-строит. журн.* 2015. № 4(56). С. 19-27. DOI 10.5862/МСЕ.56.3.
5. **Нуждин Л.В., Кузнецов А.А.** Армирование грунтов основания вертикальными стержнями // *Тр. Межд. сем. по механике грунтов, фундаментостроению и транспортным сооружениям*. М.: Изд-во МГСУ, 2000. С. 204-206.
6. **Мирсаяпов И.Т., Попов А.О.** Экспериментально-теоретические исследования работы армированных грунтовых массивов // *Изв. КГЛСУ*. 2008. № 2(10). С.75-80.
7. **Кравцов В.Н.** Проектирование вертикально армированных оснований плитных фундаментов // *Геотехника Беларуси: наука и практика: мат. Межд. науч.-техн. конф., посв. 60-летию каф. оснований, фундаментов и инженерной геологии и 90-летию со дня рожд. проф. Юрия Александровича Соболевского (Минск, 23–25 октября 2013)*. Минск: БНТУ, 2013. С. 141-149.
8. **Караулов А.М.** Методика расчета вертикально армированного основания плитного фундамента // *Материалы межд. науч.-практ. конф. ПГАСА*. Пенза: Изд-во ПГАСА, 2002. С. 66-69.
9. **Van Eekelen S.J.M., Bezuijen A.** Dutch research on basal reinforced piled embankments // *Geo-Congress*. 2013. DOI: 10.1061/9780784412787.184 9. URL: <https://biblio.ugent.be/publication/2132929>
10. **Мариничев М.Б.** Оценка эффективности свайно-плитных фундаментов с промежуточной подушкой на примере высотных зданий в сейсмических районах Краснодарского края // *Вестник Томского гос. арх.-строит. ун-та*. 2017. № 2(61). С. 182-191.
11. **Мариничев М.Б., Ткачев И.Г., Шлее Ю.** Практическая реализация метода вертикального армирования неоднородного основания для компенсации неравномерной деформируемости грунтового массива и снижения сейсмических воздействий на надземное сооружение // *Политем. сет. электр. науч. журн. Кубан. гос. аграр. ун-та*. 2013. № 94. С. 279-299.
12. **Smith M., Filz G.** Axisymmetric numerical modeling of a unit cell in geosynthetic reinforced, column supported embankments // *Geosynthetics International*. 2007. Vol. 14, no. 1. P. 13-22.
13. **Chen Y., Cao W., Chen R.P.** An experimental Investigation of Soil Arching within Basal Reinforced and Unreinforced Piled Embankments // *Geotextiles and geomembranes*. 2008. No. 26. P. 164–174.
14. **Боткин, А.И.** О прочности сыпучих и хрупких материалов // *Изв. НИИ гидротехники*. М.: Гостехиздат, 1940. Т. XXVI. С. 205-236.

Поступила в редакцию 29.11.2023

Одобрена после рецензирования 18.12.2023

Принята к опубликованию 22.12.2023



## REFERENCES

1. **Gorbunov-Posadov, V.A. Il'ichev, V.I. & Krutov.** (1985) *Foundations, foundations and underground structures: The Designer's Handbook*. M.: Stroyizdat (in Russian).
2. **Paul Teng, T.** (2000) An introduction to the deep mixing methods as used in geotechnical application, *US Department of transportation, federal highway administration* [online]. Available at: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/99138/99138.pdf>
3. **Fedorovskiy, V.G. & Bezvolev, S.G.** (1994) Method of calculation of pile fields and other vertically reinforced soil massifs, *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, (3), pp. 11-15 (in Russian).
4. **Popov, A.O.** (2015) Calculation of the final precipitation of clay bases reinforced with vertical elements, *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal*, 4(56), pp. 19-27. DOI: 10.5862/MCE.56.3 (in Russian).
5. **Nuzhdin, L.V. & Kuznetsov, A.A.** (2000) Reinforcement of the foundation soils with vertical rods, *Tr. Mezhd. sem. po mekhanike gruntov, fundamentostroyeniyu i transportnym sooruzheniyam*. M.: Izd-vo MGSU, pp. 204-206 (in Russian).
6. **Mirsayapov, I.T. & Popov, A.O.** (2008) Experimental and theoretical studies of the operation of reinforced soil massifs, *Izv. KGLSU*, 2(10), pp.75-80 (in Russian).
7. **Kravtsov, V.N.** (2013) Design of vertically reinforced slab foundations, *Geotekhnika Belarusi: nauka i praktika: Mat. mezhd. nauch.-tekhn. konf., posv. 60-letiyu kafedry osnovaniy, fundamentov i inzhenernoy geologii i 90-letiyu so dnya rozhd. Prof. Yuriya Aleksandrovicha Sobolevskogo (Minsk, 23–25 oktyabrya 2013)*. Minsk: BNTU, pp. 141-149 (in Russian).
8. **Karaulov, A.M.** (2002) The method of calculating the vertically reinforced base of the slab foundation, *Mat. Mezhd. nauch.-prak. konf. PGASA*. Penza: Izd-vo PGASA, pp. 66-69 (in Russian).
9. **Van Eekelen, S.J.M. & Bezuijen, A.** (2013) Dutch research on basal reinforced piled embankments // *Geo-Congress*. DOI:10.1061/9780784412787.1849 [online]. Available at: <https://biblio.ugent.be/publication/2132929>
10. **Marinichev, M.B.** (2017) Evaluation of the effectiveness of pile-slab foundations with an intermediate cushion on the example of high-rise buildings in seismic areas of the Krasnodar Territory, *Vestnik Tomskogo gos. arkh.-stroit. universiteta*, 2(61), pp. 182-191 (in Russian).
11. **Marinichev, M.B., Tkachev, I.G. & Shleye, Yu.** (2013) Practical implementation of the method of vertical reinforcement of an inhomogeneous base to compensate for the uneven deformability of the soil mass and reduce seismic impacts on an above-ground structure, *Politemat. set. elektr. nauch. zhur. Kuban. gos. agrar. universiteta*, (94), pp. 279-299 (in Russian).
12. **Smith, M. & Filz, G.** (2007) Axisymmetric numerical modeling of a unit cell in geosynthetic reinforced, column-supported embankments, *Geosynthetics International*, 14(1), pp. 13-22.
13. **Chen, Y., Cao, W. & Chen, R.P.** (2008) An experimental Investigation of Soil Arching within Basal Reinforced and unreinforced Piled Embankments, *Geotextiles and geomembranes*, (26), pp. 164–174.
14. **Botkin, A.I.** (1940) On the strength of loose and brittle materials, *Izv. NII gidrotekhniki*. M.: Gostekhizdat. XXVI, pp. 205-236 (in Russian).

Received 29.11.2023

Approved after reviewing 18.12.2023

Accepted 22.12.2023



SCIENTIFIC ARTICLE

# Design of buildings with energy-efficient structures from the perspective of life cycle management of the construction object

**S.V. Fedosov<sup>1</sup>, V.N. Fedoseev<sup>2\*</sup>, I.A. Zaitseva<sup>2</sup>,  
P.B. Razgovorov<sup>3</sup>, V.A. Voronov<sup>2</sup>**

**Sergey V. Fedosov**

<sup>1</sup>National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia  
*fedosov-academic53@mail.ru*

**Vadim N. Fedoseev, Irina A. Zaitseva, Vladimir A. Voronov**

<sup>2</sup>Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russia  
*4932421318@mail.ru\**; *75zss@rambler.ru*; *amenamiiii@gmail.com*

**Pavel B. Razgovorov**

<sup>3</sup>Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia  
*razgovorovpb@ystu.ru*



*The design of buildings, especially during the layout and development phase of low heat and energy structures, requires a distinct identification of energy efficiency and performance objectives. Also it should consider the flow and inflow of energy and thermal systems. It allows the project to comply with the client's and designer's requirements regarding the energy efficiency class. The required energy base for the development of construction objects is established by observing a number of approaches. These include the following ones: functional - facilities are convenient for the process; technical - facilities protect people from harmful effects; architectural and artistic expressiveness - facilities have a favourable effect on the persons' psychological condition; economic - the building uses maximum useful area with minimum labour, financial and time costs on its construction. In terms of cost-effectiveness, the requirements apply to costs over the facilities life cycle.*

**Key words:** construction project, facilities, energy-saving structures, life cycle, energy efficiency class, air exchange, buffer capacity, humidifier

**For citation:**

Fedosov, S.V., Fedoseev, V.N., Zaitseva, I.A., Razgovorov, P.B. & Voronov, V.A. (2023) Design of buildings with energy-efficient structures from the perspective of life cycle management of the construction object, *Smart Composite in Construction*, 4(4). pp. 20-29 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4_2023)



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 697:621.577

# Проектирование зданий с энергосберегающими конструкциями с позиций управления жизненного цикла объекта строительства

**С.В. Федосов<sup>1</sup>, В.Н. Федосеев<sup>2\*</sup>, И.А. Зайцева<sup>2</sup>,  
П.Б. Разговоров<sup>3</sup>, В.А. Воронов<sup>2</sup>**

**Сергей Викторович Федосов**

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,  
Москва, Российская Федерация  
*fedosov-academic53@mail.ru*

**Вадим Николаевич Федосеев, Ирина Александровна Зайцева, Владимир Андреевич Воронов**

<sup>2</sup>Ивановский государственный политехнический университет, Иваново, Российская Федерация  
*4932421318@mail.ru\**; *75zss@rambler.ru*; *amenamiiii@gmail.com*

**Павел Борисович Разговоров**

<sup>3</sup>Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация  
*razgovorovpb@ystu.ru*

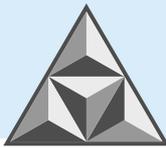


*Проектирование зданий, особенно на этапе планировки и разработки конструкций с низким тепло- и энергопотреблением, требует четкого обозначения задач по обеспечению энергоэффективности и производительности, с учетом расхода и притока энергетических и тепловых систем. Это позволяет соблюдать требования заказчика и проектировщика в отношении класса энергоэффективности. Необходимая энергетическая база для развития строительных объектов создается при соблюдении ряда подходов: функциональный – строения и конструкции являются удобными для осуществления процесса; технический – здания и строительные конструкции надежно защищают людей от вредных воздействий, являются долговечными и прочными; архитектурно-художественная выразительность – здания и конструктивные элементы оказывают благоприятное воздействие на психологическое состояние человека; экономический – в здании задействуется максимум полезной площади при минимальных затратах труда, средствах и времени на его постройку и возведение строительных конструкций. В отношении экономичности требования распространяются на расходы в течение всего срока эксплуатации зданий и конструкций.*

**Ключевые слова:** строительный объект, здания и энергосберегающие конструкции, жизненный цикл, класс энергоэффективности, воздухообмен, буферная емкость, увлажнитель воздуха

**Для цитирования:**

Федосов С.В., Федосеев В.Н., Зайцева И.А., Разговоров П.Б., Воронов В.А. Проектирование зданий с энергосберегающими конструкциями с позиций управления жизненного цикла объекта строительства // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 4. С. 20-29. URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4_2023)

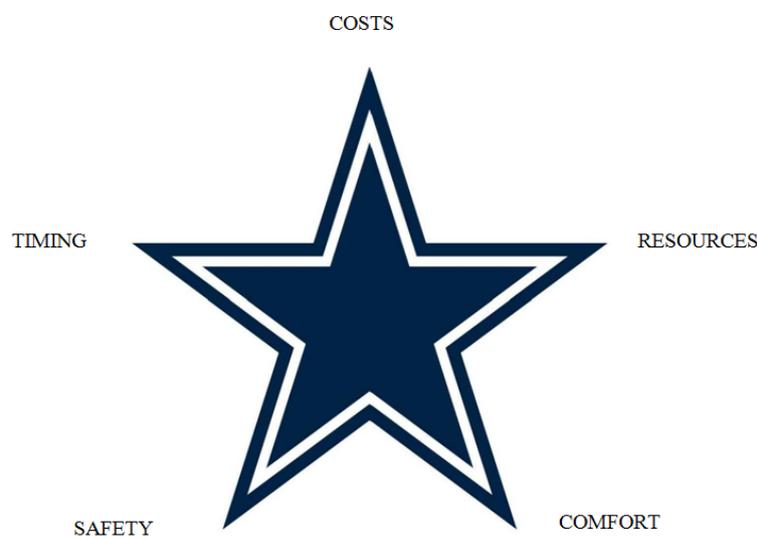


## INTRODUCTION

The energy efficient management of the construction object life cycle is associated with the period of performing the cumulative operating mode of the development stages of the object. This mode should be asset-based by the resources and economic reasonability.

Nowadays, the life cycle in engineering systems [1-3] is considered as the development of energy saving, ecology, climatology, and other economically beneficial services of a real estate object created for human needs.

A building object advances during its life cycle and changes its energy consumption, passing through certain stages. Therefore, sustainable life support systems planned for that stage should be available at each stage of the life cycle. The implementation of priority engineering and technological solutions can be represented as an energy efficiency star (Fig. 1).



**Fig. 1.** Energy efficiency star of the life cycle condition of the construction object

**Рис. 1.** Звезда энергоэффективности состояния жизненного цикла объекта строительства

The tops of the star are chosen intentionally. In terms of the stages of the construction object life cycle they are as follows:

Costs imply cost reduction; resources imply reduction of resources; timing is a reduction of the time of realization of the operating mode; safety is the reduction of harmful emissions and improvement of environmental safety of construction facilities; comfort is an increase in the comfort of the working condition during the facility construction.

The purpose of the paper is to ensure the life cycle of buildings with energy-saving structures, taking into account the installation of advanced thermal systems indoors.

## EXPERIMENTAL PART

We will consider the mode of energy efficient building as an economical energy consumption of its operating state in the operation mode. The energy efficiency of buildings and structures is an economically feasible energy saving, an indicator that characterizes the optimization of "life cycle cost", including the initial costs of facility life support, the operation costs, etc. It is also reasonable to forecast changes for available energy resources and their cost.

The comparison of recommended and obtained results during the operation of the building with energy-efficient structures becomes the starting point for determining the energy efficiency class



labeling according to Government Decree No. 1628 on 27.09.2021. In accordance with Clause 2 of Decree No. 1628, the basic requirements for energy efficiency of buildings include an assessment of energy consumption. The main indicators are the consumption of electric and thermal energy for heating, hot water supply, and ventilation [4]. Article 13 clause 7 of Law 261-FZ as revised on 14.07.2022, which came into force on 01.01.2023, states: "The developer is obliged... to provide metering devices for energy resources used" according to the engineering specifications adopted.

The modern architectural and design approach to the use of energy efficient designs requires close co-operation both with energy and environmental engineers, especially during the planning and design phase of a low energy project.

Achievement of energy-saving solutions is realized through the use of rationally selected special equipment, installations, and structural elements, such as:

- heat pumps;
- cavitation heat generators;
- heat exchangers;
- supply and exhaust ventilation system;
- floor heating;
- fan coil;
- solar photovoltaic panels;
- solar collectors for hot water supply;
- wind farms - heat and electricity.

According to the Ministry of Construction of the Russian Federation requirements for energy-efficient construction and energy-saving structures, prior indicators characterizing resource consumption may be electricity, heating, and ventilation. Their use can establish the energy efficiency class of a building.

The change of working parameters of heat exchange systems, heat carrier flow rate, hydraulic regime during operation of energy efficient equipment, and operation of energy saving structural elements can provide heat savings and redistribution indoors.

Modern building design and the use of the proposed structural elements require an advanced solution to the problems of energy efficiency, performance, energy and heat supply indoors.

Although the indoor air environment is protected from direct impact by the building envelope under certain conditions it can have harmful effect on human health and the nature of technological processes:

- ❖ Building and finishing materials - 30-50%;
- ❖ Human waste products - 10-30%;
- ❖ Operation of household appliances and household chemicals - 10%;
- ❖ Input of polluted atmospheric air - 20-40%.

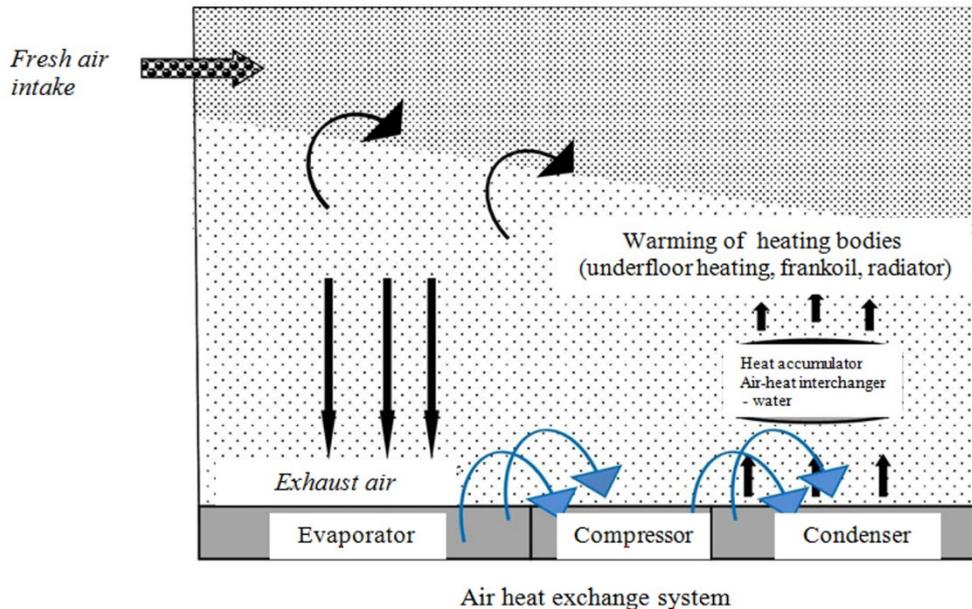
Ensuring the required parameters of the indoor air environment allows us to ensure the people's comfort life.

## RESULTS AND DISCUSSION

Scientists of Moscow State Construction University, Ivanovo Polytechnic University and Yaroslavl State Technical University continue research on the creation of technical complexes with the inclusion of new structural elements indoors. Energy-efficient air heat exchange systems (heat pumps) integrated with combined supply and exhaust ventilation and built-in air purity device, previously described in [5-7], can be referred to such complexes. For instance, a mixed air environment and fresh air microclimate is developed in the work space indoors (Fig. 2).



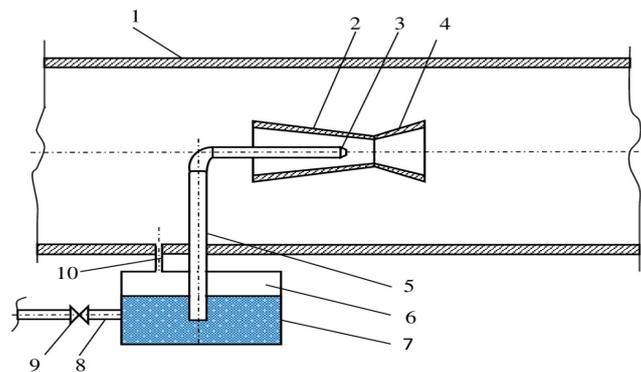
## ADVANCED ENERGY-EFFICIENT ROOM AIR EXCHANGE



**Fig. 2.** Scheme of heat supply and air exchange of the room by heat exchange system and supply ventilation

**Рис. 2.** Схема теплообеспечения и воздухообмена помещения теплообменной системой и приточной вентиляцией

The technological concept consists in the air intake from the surrounding space for the heat pump, which heat the coolant in the buffer tank (accumulator). The air-heat interchanger heats the heating devices supporting heat supply, temperature, and condition of indoor air with updated thermophysical parameters [8-12]. We designed an air humidifier to obtain the effect of pollution control for rooms with the maintained humidity should not be lower than the values of the comfort microclimate (Fig. 3)



**Fig. 3.** Air humidifier: 1 – duct; 2 – confuser; 3 – nozzle; 4 – diffuser; 5 – liquid supply pipe; 6 – compressed air; 7 – liquid; 8 – duct; 9 – adjustable valve

**Рис. 3.** Устройство увлажнения воздуха: 1 – воздуховод; 2 – конфузор; 3 – сопло; 4 – диффузор; 5 – трубка, подводящая жидкость; 6 – сжатый воздух; 7 – жидкость; 8 – воздуховод; 9 – регулируемый вентиль

The patent No. 208767 on 18.01.2022 for this humidifier was obtained earlier [13].

The level of efficient operation of the indoor heat exchange system is ensured by aerodynamic stability and balanced exchange of supply exhaust air. It explains the energy-saving heat generation corresponding to the efficiency factor of the heat exchange system at the level of 2.50-5.01 [13, 14]. Indeed, the value of 2.50 corresponds to the heating of air-heat interchanger up to 50°C, and the value of 4.00 corresponds to heating of air-heat interchanger up to 35°C [15-17].



The heat pump system provides air intake from the room for the device with heating of the air-heat interchanger in the accumulator (buffer tank). As a result, the air in the room obtains new thermo-physical parameters corresponding to the fresh air. The use of forced air intake system based on the signal of carbon dioxide sensor allows us to organise the most energy-efficient ventilation system (automation works) with minimal operating costs and adaptive control [18]. The energy saving effect is at the level of 50-60% [19, 20].

An integrated energy efficient approach to the life cycle process of a construction project with the joint application of new structural and energy saving solutions include both customer and designer requirements and the energy efficiency class. During the operation of the building with the integration of new energy-saving designs and class assessment, it is necessary to pay special attention to the following indicators:

- specific consumption of utilities;
- changes in the specific consumption of utilities of the building compared to the baseline indicated in the energy efficiency class.

## CONCLUSIONS

Nowadays, in the context of the modelling development and scientific research in the field of life cycle management of civil engineering objects equipped with the energy-saving systems, the design of the heat-saving solutions fundamental methodology are in high demand. This design provides an opportunity to generalise previously proposed, new effective ones, and alternative approaches to the establishment and modernisation of cost-effective technologies in the construction industry.

## REFERENCES

1. *On the concept of implementing a life cycle management system for capital construction projects using BIM technologies* [online]. Available at: <https://gge.ru/upload/iblock> (assessed 01.08.2023) (in Russian).
2. **Malakhov, V.** (2021) Life cycle engineering: shish kebab or churchkhela! *Stroitelnyy ekspert* [online]. Available at: <https://ardexpert.ru/article/20733>. (assessed 01.08.2023) (in Russian).
3. **Talapov, V.** (2017) The life cycle of a building and its connection with the introduction of BIM technology, *Otechestvennye razrabotki*, (2), pp. 8-11 [online]. Available at: <https://sapr.ru/article/25376> (assessed 01.08.2023). (in Russian).
4. *Decree of the Government of the Russian Federation No. 1628 on 27.09.2021 «On Approval of the Rules for Establishing Energy Efficiency Requirements for Buildings, Structures, Structures and Requirements for the Rules for Determining the energy Efficiency Class of Apartment Buildings»* (in Russian).
5. **Aloyan, R.M., Fedoseev, V.N. & Vinogradova, N.V.** (2018) Energy-saving heating with the function of an air heat pump and microclimate. Fundamental. Exploratory research of the RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2017, *Sb. nauch. tr. Ross. akad. arkhitektury i stroit. nauk*. Moscow, pp. 50-53. DOI: 10.22337/9785432302663-50-53 (in Russian).
6. **Fedosov, S.V., Fedoseev, V.N. & Emelin, V.A.** (2021) Efficiency of the mixing chamber design when working together with an air heat pump system for heating premises, *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Region. prilozhenie*, 1(65), pp. 94-100. DOI: 10.6060/snt.20216501.0012 (in Russian).
7. **Fedosov, S.V., Fedoseev, V.N. & Zaitseva, I.A.** (2020) Recirculating air heat pump with recuperation: experience of application, *Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika: AVOK*, (8), pp. 54-57 (in Russian).
8. **Lebedeva, N.A.** (2012) Ventilation and internal microclimate, *Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika: AVOK*, (3), pp. 42-51 (in Russian).



9. **Fanger, P.** (2003) The quality of indoor air in the XXI century: the impact on comfort, productivity and human health, *Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika: AVOK*, (4) (in Russian).
10. **Tabunshchikov, Yu.A. & Brodach, M.M.** (2018) Artificial intelligence in the management of heat and energy consumption of a building, *Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika: AVOK*, (8), pp. 14-21 (in Russian).
11. **Fanger, P.** (2006) Indoor air quality in buildings built in cold climates, *Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika: AVOK*, (2) (in Russian).
12. **Seppanen, O.** (2000) Energy-efficient ventilation systems to ensure a high-quality indoor climate, *Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika: AVOK*, (5) (in Russian).
13. Patent No. 208767 RU. *Air humidifier* / **Fedosov S.V., Fedoseev V.N., Emelin V.A., Voronov V.A., Loginova S.A.** Publ. 2022 (in Russian).
14. **Koryagin, M.V.** (2015) The need for an engineering approach to energy saving on real estate objects, *16-y Mezhd. nauch.-promyshl. forum «Velikiye reki-2014»: Tr. kongressa*, (3). N. Novgorod: NNGASU, pp. 88-91 (in Russian).
15. **Abramyan, S.G., Oganessian, O.V. & Sibirskiy, E.V.** (2022) Energy-efficient reconstruction at various stages of the construction system life cycle, *Inzhenernyy vestnik Dona*, 1(85), pp. 459-469 (in Russian).
16. **Lebedeva, N.A.** (2012) Ventilation and internal microclimate, *Ventilyatsiya, otopleniye, konditsionirovaniye vozdukha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika: AVOK*, (3) (in Russian).
17. SanPiN 2.2.4.548-96. *Physical factors of the production environment. Hygienic requirements for the microclimate of industrial premises. Sanitary rules and regulations (approved Resolution of the State Sanitary and Epidemiological Supervision of the Russian Federation dated 01.10.1996 N 21)* (in Russian).
18. Adaptive ventilation systems: promising directions of development. (2011) *Ventilyatsiya. Otoplenie. Konditsionirovanie: AVOK*, (7) (in Russian).
19. **Miftakhova, E.D.** (2020) Energy-efficient ventilation systems to ensure a high-quality indoor microclimate, *Mezhd. nauch. zhurn. «Vestnik nauki*, 6(27), pp. 192-195 (in Russian).
20. **Olesen, V.** (2015) Microclimate parameters in the design of engineering systems and assessment of energy efficiency of the building, *Ventilyatsiya. Otoplenie. Konditsionirovanie: AVOK*, (3) (in Russian).

Received 13.11.2023

Approved after reviewing 01.12.2023

Accepted 08.12.2023

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О концепции внедрения системы управления жизненным циклом объектов капитального строительства с использованием BIM-технологий. URL: <https://gge.ru/upload/iblock>.
2. **Малахов В.** Инжиниринг жизненного цикла: шашлык или чурчхела! // *Строительный эксперт*. 2021. URL: <https://ardexpert.ru/article/20733>.
3. **Талапов В.** Жизненный цикл здания и его связь с внедрением технологии BIM // *Отечественные разработки*. 2017. № 2. С. 8-11. URL: <https://sapr.ru/article/25376>.
4. Постановление Правительства РФ от 27.09.2021 №1628 «Об утверждении Правил установления требований энергетической эффективности для зданий, строений, сооружений и требований к правилам определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов».
5. **Алоян Р.М., Федосеев В.Н., Виноградова Н.В.** Энергосберегающее отопление с функцией воздушного теплового насоса и микроклимата. Фундаментальные. Поисковые исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2017 году // *Сб. науч. тр. Рос. Акад. архитектуры и строит. наук*. Москва, 2018. С. 50-53. DOI: 10.22337/9785432302663-50-53

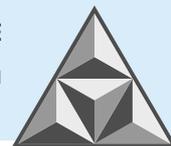


6. **Федосов С.В., Федосеев В.Н., Емелин В.А.** Эффективность конструкции смесительной камеры при совместной работе с воздушной теплонасосной системой теплоснабжения помещений // *Современные наукоемкие технологии. Регион. приложение*. 2021. № 1(65). С. 94-100. DOI: 10.6060/snt.20216501.0012
7. **Федосов С.В., Федосеев В.Н., Зайцева И.А.** Рециркуляционный воздушный тепловой насос с рекуперацией: опыт применения // *Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика: АВОК*. 2020. № 8. С. 54-57.
8. **Лебедева Н.А.** Вентиляция и внутренний микроклимат // *Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика: АВОК*. 2012. № 3. С. 42-51.
9. **Фангер П.** Качество внутреннего воздуха в XXI веке: влияние на комфорт, производительность и здоровье людей // *Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика: АВОК*. 2003. № 4.
10. **Табунщиков Ю.А., Бродач М.М.** Искусственный интеллект в управлении энергопотреблением здания // *Вентиляция, отопление кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика: АВОК*. 2018. № 8. С. 14-21.
11. **Фангер П.** Качество внутреннего воздуха в зданиях, построенных в холодном климате // *Вентиляция, отопление кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика: АВОК*. 2006. № 2.
12. **Сеппанен О.** Энергоэффективные системы вентиляции для обеспечения качественного микроклимата помещений // *Вентиляция, отопление кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика: АВОК*. 2000. № 5.
13. Патент № 208767 РФ. Увлажнитель воздуха / **Федосов С.В., Федосеев В.Н., Емелин В.А., Воронов В.А., Логинова С.А.** Оpubл. 2022.
14. **Корягин М.В.** Необходимость инжинирингового подхода к энергосбережению на объектах недвижимости // *16-й Межд. науч.-промышл. форум «Великие реки-2014»: Тр. конгресса*. Т. 3. Н. Новгород: ННГАСУ, 2015. С. 88-91
15. **Абрамян С.Г., Оганесян О.В., Сибирский Е.В.** Энергоэффективная реконструкция на различных этапах жизненного цикла строительной системы // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 1(85). С. 459-469.
16. **Лебедева Н.А.** Вентиляция и внутренний микроклимат // *Вентиляция, отопление кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика: АВОК*. 2012. № 3.
17. СанПиН 2.2.4.548-96. Физические факторы производственной среды. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы (утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 01.10.1996 № 21).
18. Системы адаптивной вентиляции: перспективные направления развития // *Вентиляция. Отопление. Кондиционирование: АВОК*. 2011. № 7. С. 30-32.
19. **Мифтахова Э.Д.** Энергоэффективные системы вентиляции для обеспечения качественного микроклимата помещений // *Межд. науч. журн. «Вестник науки»*. 2020. № 6(27). С. 192-195.
20. **Олесен В.** Параметры микроклимата при проектировании инженерных систем и оценке энергоэффективности здания // *Вентиляция. Отопление. Кондиционирование: АВОК*. 2015. № 3. С. 16-23.

Поступила в редакцию 13.11.2023

Одобрена после рецензирования 01.12.2023

Принята к опубликованию 08.12.2023



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691-404; 539.61

# Градиентная модель адгезии жидкости на поверхности строительного материала

**А.А. Игнатъев<sup>1,2</sup>, В.М. Готовцев<sup>3\*</sup>, П.Б. Разговоров<sup>3</sup>**

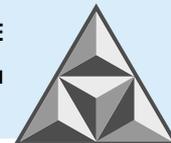
**Алексей Александрович Игнатъев**

<sup>1</sup>Российский дорожный научно-исследовательский институт, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Научно-исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Российская Федерация  
*ignatievaa@rosdornii.ru*

**Валерий Михайлович Готовцев, Павел Борисович Разговоров**

<sup>3</sup>Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация  
*gotovtsev\_vm@mail.ru\**; *razgovorovpb@ystu.ru*

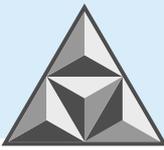


*Сформирован тензор напряжений в межфазном слое жидкость – твердый строительный материал, удовлетворяющий условиям равновесия и включающий шаровую и девиаторную компоненты. Шаровая часть тензора напряжений представлена внутренним давлением жидкости. Показано, что в рамках принятой модели в межфазном слое жидкость – твердое, в отличие от слоя жидкость – газ, не происходит накопления поверхностной энергии. Установлено, что напряжения, формирующие поверхностное натяжение межфазного слоя, являются компонентами девиатора напряжений, а распределение давления жидкости по толщине межфазного слоя нелинейно, что приводит к формированию мощных градиентов давления, определяющих специфику явлений на поверхности материала. Давления жидкой и твердой фаз в зоне их непосредственного контакта различаются, что обусловлено проявлением эффекта адгезии. Разработанный подход базируется на общих представлениях механики сплошных сред, что позволяет не учитывать специфику различных видов адгезионных взаимодействий жидкой фазы и твердой поверхности материала.*

**Ключевые слова:** жидкость – твердая поверхность материала, тензор напряжений, сидячая капля, поверхностная энергия, внутреннее давление, модель адгезии жидкости

**Для цитирования:**

Игнатьев А.А., Готовцев В.М., Разговоров П.Б. Градиентная модель адгезии жидкости на поверхности строительного материала // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 4. С. 30-49. URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4_2023)



SCIENTIFIC ARTICLE

# Gradient model of liquid adhesion on the building material surface

**A.A. Ignatyev<sup>1,2</sup>, V.M. Gotovtsev<sup>3\*</sup>, P.B. Razgovorov<sup>3</sup>**

**Aleksey A. Ignatyev**

<sup>1</sup>Russian Road Research Institute, Moscow, Russia

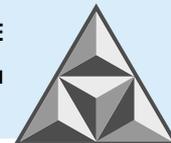
<sup>2</sup>Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

*ignatievaa@rosdornii.ru*

**Valeriy M. Gotovtsev, Pavel B. Razgovorov**

<sup>3</sup>Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

*gotovtsev\_vm@mail.ru\**; *razgovorovpb@ystu.ru*

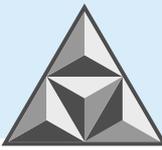


*Considerable energy resources are consumed in the production of building materials, during construction and installation works, for operation with current and major repairs, reconstruction, dismantling, utilisation and recycling. As a rule, these energy resources are non-renewable, therefore, for energy saving purposes, it is necessary to take into account the total energy consumption of capital construction facilities during their life cycle. The authors have proposed the structure of a relational database of building materials energy intensity to calculate energy costs. The proposed database contains a list of building materials and energy intensity values at all stages of the life cycle. The novelty of the database is the division of materials by building elements (replaceable, non-replaceable). The article presents fragments of energy intensity calculation of the apartment building life cycle in the Ivanovo city using the proposed database.*

**Key words:** liquid – solid material surface, stress tensor, sitting drop, surface energy, internal pressure, liquid adhesion model

**For citation:**

Ignatiev A.A., Gotovtsev V.M. & Razgovorov P.B. (2023) Gradient model of liquid adhesion on the building material surface, *Smart Composite in Construction*, 4(4), pp. 30-49 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4_2023)



## ВВЕДЕНИЕ

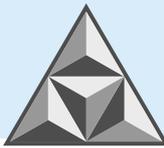
Большинство известных строительных материалов – композиты, включающие дисперсную фазу, состоящую, как правило, из минеральных частиц, и дисперсионную среду, работающую как связующее. К таким материалам традиционно относят кирпич, цементный раствор, бетон, асфальтобетон и т.п. Поверхностные явления лежат в основе нанотехнологий, позволяющих получать материалы с принципиально новыми или заранее обусловленными свойствами. В связи с этим исследования в этой области получили мощный толчок к развитию.

Процесс взаимодействий на поверхности строительного материала приводит к возникновению связей различного рода (силы Ван-дер-Ваальса, водородные связи, специфические донорно-акцепторные и химические взаимодействия). Различают несколько механизмов адгезии, в зависимости от природы взаимодействующих фаз и условий проведения процесса (механическая, диффузионная, адсорбционная и электростатическая адгезии). Однако в реальных системах чаще всего реализуется смешанный механизм, включающий каждый из обозначенных видов адгезии.

Как результат, в настоящее время в орбиту исследователей явлений на поверхности строительных материалов включен не один десяток поверхностных сил, отвечающих за межфазное взаимодействие. По мнению В.И. Ролдугина [1], мы сейчас сталкиваемся с ситуацией, подобной имевшей место в физике в начале XX века, когда для каждого явления вводились свои «собственные» силы. Моделирование силовых взаимодействий фаз для всех перечисленных механизмов адгезии производится в предположении формирования силовых полей с учетом специфики контактирующих сред. Набор возможных сочетаний свойств разнородных фаз чрезвычайно широк, что препятствует выработке единого подхода к моделированию адгезионных явлений в зоне контактов.

Несмотря на то что основы теории поверхностных явлений были заложены Лапласом и Юнгом более двухсот лет назад, многие положения к настоящему времени не получили должного обоснования. Так, в [2] отмечается, что капиллярное давление, определяемое формулой Лапласа традиционно трактуется как гидростатическое, в то время как Лаплас при выводе формулы оперировал молекулярным давлением. Однако значения этих видов давлений кардинально отличаются друг от друга. Там же указывается на отсутствие физического обоснования вертикальной составляющей поверхностного натяжения при рассмотрении равновесия линии трехфазного контакта для сидячей капли на твердой поверхности материала. В [3] ставится вопрос о механизме формирования тангенциальной ориентации силы поверхностного натяжения при условии нормальных к межфазной поверхности силовых воздействий.

Этот перечень можно было бы продолжить и далее, но отмеченное выше оказывается достаточным, чтобы сделать вывод о необходимости разработки нового подхода к моделированию поверхностных явлений. В монографии Б.В. Дерягина [4] указывается способ реализации такого подхода, состоящий «в замене кулоновских и молекулярных (дисперсионных) сил системой натяжений. Возможность такой замены не зависит от физического существа этих сил, так как базируется на формальной эквивалентности электромагнитных сил системе натяжений». В настоящей работе сделана попытка осуществления такого подхода в рамках модели несжимаемой жидкости с использованием аппарата механики сплошной среды для изучения равновесия межфазного слоя жидкость – твердая поверхность материала, который рассматривается как слой жидкости конечной толщины.



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Основным показателем адгезионных процессов является работа адгезии, численно равная работе, затраченной на изотермический разрыв взаимодействующих поверхностей конденсированных фаз гетерогенной системы. Работа адгезии  $W_a$ , отнесенная к единице площади межфазной поверхности, определяется по уравнению:

$$W_a = \gamma_{sg} + \gamma_{lg} - \gamma_{ls}, \quad (1)$$

где  $\gamma_{sg}$  – поверхностное натяжение системы твердый материал – газ,  $\gamma_{lg}$  – жидкость – газ,  $\gamma_{ls}$  – жидкость – твердый материал. Приведенное выражение носит название уравнения Дюпре, которое по физическому смыслу отражает закон сохранения энергии в процессе изотермического разрыва межфазного контакта жидкость – твердое  $\gamma_{ls}$  с образованием двух новых межфазных поверхностей твердое – газ и жидкость – газ с поверхностными натяжениями  $\gamma_{sg}$  и  $\gamma_{lg}$ .

Основу уравнения составляют соображения общего плана, не дающие представления о механизме контактного взаимодействия фаз. Кроме того, в уравнении (1) присутствует поверхностное натяжение твердый материал – газ  $\gamma_{sg}$ , методов определения которого в настоящее время неизвестны, что ставит под сомнение сам факт его существования. Уравнение Дюпре было усовершенствовано с использованием соотношений при рассмотрении равновесия линии трехфазного контакта сидячей капли на твердой поверхности. В результате работа адгезии может быть определена уравнением:

$$W_a = \gamma_{lg}(1 + \cos \theta_0), \quad (2)$$

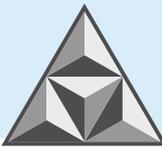
получившем название уравнения Дюпре-Юнга, где  $\theta_0$  – значение краевого угла смачивания сидячей капли.

В записанных уравнениях поверхностные натяжения рассматриваются как затраты энергии, необходимые для создания единицы межфазной поверхности. Увеличение энергии системы, вследствие образования области контакта разнородных фаз, определяется известным уравнением термодинамики:

$$P \cdot dV = \gamma \cdot dS, \quad (3)$$

в котором  $P$  – давление,  $dV$  – изменение объема,  $dS$  – изменение площади межфазной поверхности,  $\gamma$  – поверхностное натяжение. Это соотношение использовано Лапласом при выводе известного уравнения для определения капиллярного давления, создаваемого искривленной свободной поверхностью жидкости. При этом возникает вопрос об изменении объема  $dV$  в жидкой капле в процессе формирования межфазного слоя жидкость – газ с учетом практически несжимаемой жидкости.

В этом случае логичным будет предположение о том, что в качестве изменения объема системы следует принять объем жидкости в сформированном межфазном слое. Однако значение толщины межфазного слоя, по данным литературных источников, измеряется в ангстремах или нанометрах [5], то есть имеет порядок  $10^{-10}$  –  $10^{-9}$  м. В соответствии с этим изменение объема  $dV$  является малой величиной, откуда следует, что для создания капиллярного давления, по формуле Лапласа, требуется очень высокое давление  $P$ , существенно превышающее гидростатическое давление. Таким давлением может быть молекулярное или внутреннее давление жидкости, значение которого определяется



исследованием сжимаемости жидкости и, по данным различных литературных источников, составляет для воды от 10000 до 15000 атм. [6-9].

Термодинамическое представление поверхностного натяжения, использованное выше, не отражает характера межфазных взаимодействий, в связи с чем возникает необходимость представления межфазного слоя как отдельного объекта равновесия, обладающего свойствами, отличающимися от свойств объемных фаз, его формирующих. Воспользуемся известной формулой Баккера [10] для определения поверхностного натяжения межфазного слоя:

$$\gamma = \int_{-\infty}^{\infty} [p - p_{\tau}(z)] dz, \quad (4)$$

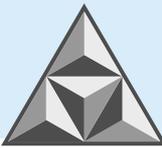
где  $p$  – давление среды в межфазном слое,  $p_{\tau}(z)$  – компонента тензора напряжений, действующая в плоскости межфазного слоя,  $z$  – координата, нормальная к поверхности слоя. Записанное уравнение широко используется при описании поверхностных явлений, но параметры, входящие в нее, требуют уточнения. В частности, в некоторых литературных источниках давление  $p$  трактуется как гидростатическое давление, в других – как внутреннее давление жидкости. Физическая сторона зависимости  $p_{\tau}(z)$  не раскрывается, а указывается лишь на сложный ее характер, обусловленный межмолекулярными взаимодействиями [11].

Присутствующие в уравнении параметры определяют силовые поля, обусловленные действием молекулярных сил. В объемной фазе жидкости межмолекулярное взаимодействие осуществляется дальнедействующими силами притяжения, которые уравниваются силами молекулярного отталкивания с формированием уравновешенного изотропного поля сил давления. Распределение давлений в такой системе определяется внешними воздействиями и описывается уравнениями гидростатики. В тонких межфазных слоях вследствие контактного взаимодействия разнородных фаз возникает межмолекулярное силовое поле, приводящее к нарушению равновесия в макроскопическом представлении. В результате образуется межфазный слой – переходная структура, в тензоре напряжений которой появляются составляющие, отличные от компонент изотропного давления, присутствующие в формуле Баккера как  $p_{\tau}(z)$ .

Наличие компоненты  $p_{\tau}(z)$  тензора межфазных напряжений свидетельствует о том, что тензор напряжений в межфазном слое является анизотропным, т.е. содержит компоненты, отличные от составляющих давления. Исходя из этого, целесообразно представить тензор напряжений совокупностью шаровой части с компонентами давления и девиатора напряжений [12]. При этом шаровая часть тензора отражает действие в среде сил молекулярного притяжения, уравновешенных силами отталкивания, формируя равновесное поле, обусловленное внутренними свойствами жидкости, не зависящими от внешних воздействий. Компоненты девиатора напряжений отражают воздействие твердой фазы на жидкость, которое рассматривается как внешний силовой фактор, искажающий равновесное состояние среды с образованием переходной области со свойствами, отличными от свойств сформировавших его фаз.

В соответствии с изложенным, при моделировании процесса адгезии будем рассматривать межфазный слой жидкость – твердое как самостоятельный объект механического равновесия, подчиняющийся законам механики сплошной среды, с использованием модели несжимаемости жидкости.

Межмолекулярные взаимодействия, составляющие основу специфики строения межфазных слоев, отражаются использованием внутреннего давления среды при разработке тензора напряжений в межфазном слое.



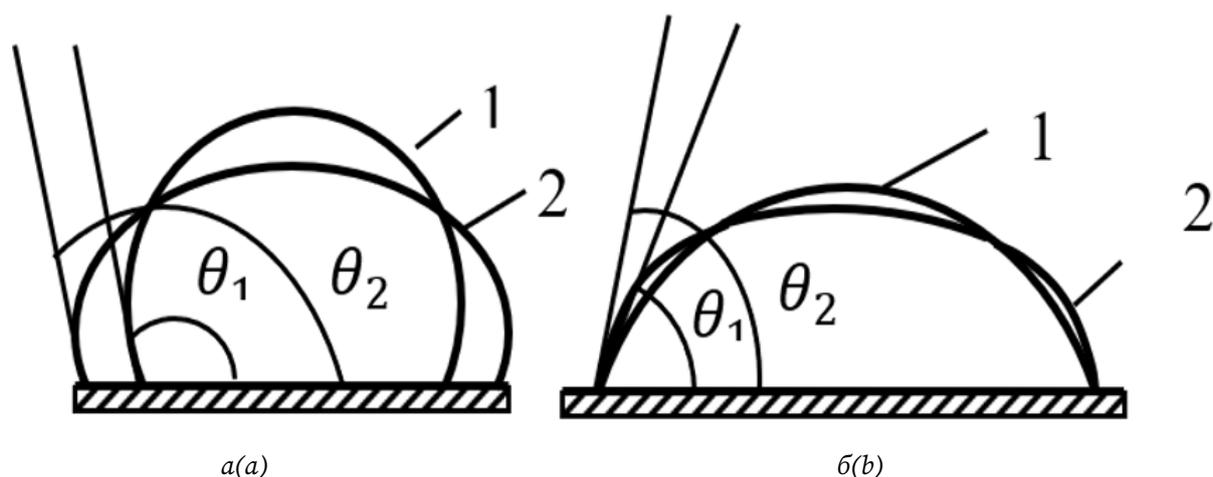
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Приведенное выше уравнение (1) для работы адгезии получено из общих энергетических соображений, связанных с возникновением новых межфазных поверхностей при разрыве контакта между взаимодействующими фазами. В уравнение входят параметры сидячей капли, образованной при естественном растекании жидкости по твердой поверхности материала под действием силы тяжести. Однако технология получения композиционных материалов связана с распределением жидкостного связующего в массе дисперсной системы, в ходе которого материал подвергается интенсивному внешнему силовому воздействию, сопоставимому с нагрузками при разрыве контакта фаз. Этот фактор может оказаться решающим при формировании адгезионных контактов.

Подобного плана проблемы рассматриваются в последние годы в связи с интенсивным освоением космического пространства. Взаимодействие жидкой и твердой фаз составляет основу многих технологических процессов, таких как сварка, пайка, склеивание материалов и т.п., с которыми неизбежно придется столкнуться в космосе в условиях гравитации. Очевидно, что изменение условий проведения таких операций должно отражаться на результатах проводимых процессов. В связи с этим появилось достаточно большое количество публикаций [13-17], большая часть которых сводится к констатации эффектов, связанных с проявлением адгезии в условиях измененной гравитации.

В [16] приводятся результаты эксперимента, проведенного в ходе параболических полетов Европейского космического агентства. Из материалов следует, что изменение гравитации по-разному отражается на форме сидячей капли в зависимости от значений краевых углов смачивания.

На рис. 1 показан характер изменения формы капель с увеличением гравитации, из которого следует, что внешнее силовое воздействие оказывает влияние на адгезионный процесс, но вопрос о степени влияния и изменении механизма адгезии в работе не раскрывается.

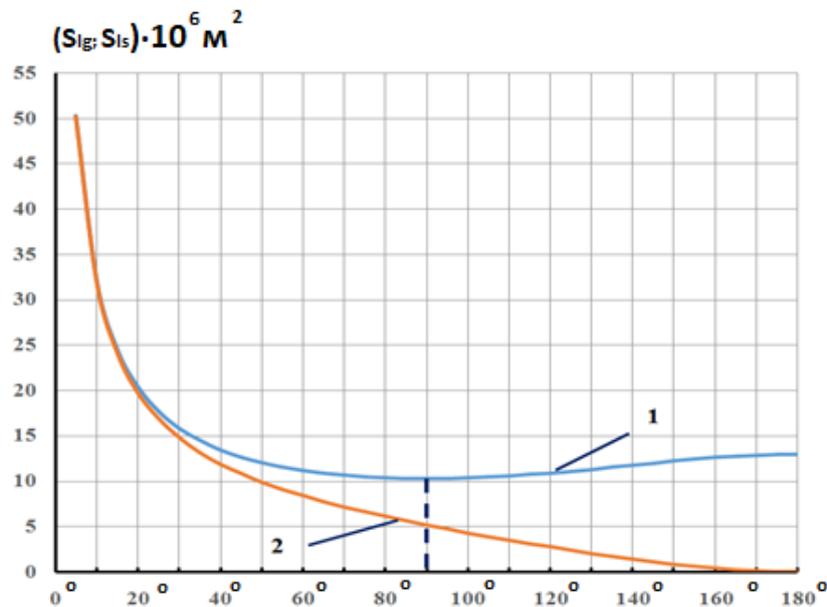
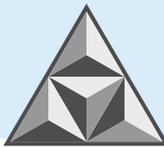


**Рис. 1.** Зависимость профиля капли от уровня гравитации и угла смачивания:

*a* – уровень гравитации –  $g$  ( $9.81 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ ); *б* – уровень гравитации больше  $g$

**Fig. 1.** Dependence of droplet profile on gravity level and wetting angle:

*a* – gravity level –  $g$  ( $9.81 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$ ); *b* – gravity level greater than  $g$



**Рис. 2.** Зависимость площадей межфазных поверхностей сидячей капли от краевого угла смачивания: 1 – жидкость – газ; 2 – жидкость – твердый материал

**Fig. 2.** Dependence of the interphase surface areas of a sitting drop on the wetting edge angle: 1 – liquid – gas; 2 – liquid – solid material

Для объяснения обнаруженного эффекта проведен расчет площадей межфазных поверхностей жидкость – газ и жидкость – твердое для сидячей капли постоянного объема в зависимости от значений краевого угла смачивания  $\theta_0$  в предположении слабого отклонения формы свободной поверхности капли от сферической. Результаты расчета показаны на рис. 2. Приведенные зависимости получены с использованием геометрических соотношений для шарового сегмента постоянного объема, равного объему шаровой капли с радиусом 1 мм.

$$R = \sqrt[3]{\frac{3V}{\pi(2 - 3\cos\theta_0 + \cos^3\theta_0)}}; \quad V = \frac{4}{3}\pi R_0^3; \quad S_{сф} = 2\pi R^2(1 - \cos\theta_0); \quad S_{конт} = \pi(R\sin\theta_0)^2; \quad (5)$$

$$z_c = R \left( \frac{2}{3} \frac{\sin^3\theta_0}{\theta_0 - \sin\theta_0\cos\theta_0} \right). \quad (6)$$

В уравнениях (5) и (6) использованы обозначения:  $V$  – объем шаровой капли радиуса  $R_0$ ;  $R$  – радиус кривизны свободной поверхности;  $S_{lg}$  – площадь свободной поверхности,  $S_{ls}$  – площадь пятна контакта жидкости с твердой поверхностью;  $\theta_0$  – значение краевого угла смачивания;  $U_{lg} = \gamma_{lg} \cdot S_{lg}$  – поверхностная энергия межфазного слоя жидкость – газ, где  $\gamma_{lg} = 0.07 \text{ Н/м}^{-1}$  – поверхностное натяжение межфазного слоя,  $U_{ls} = \gamma_{lg} \cdot \cos\theta_0 \cdot S_{ls}$  – поверхностная энергия межфазного слоя жидкость – твердое,  $z_c$  – расстояние от центра описанной сферы до центра тяжести шарового сегмента,  $z_s$  – превышение центра тяжести над горизонтальной твердой поверхностью,  $\Delta A_G$  – работа силы тяжести при изменении угла смачивания от  $\theta_0 = 0$  до текущего значения.

Кривая 1 на рис. 2 показывает изменение площади свободной поверхности капли, кривая 2 – площади пятна контакта жидкой и твердой фаз с увеличением значения краевого угла смачивания. При  $\theta_0 = 0$  в условиях абсолютного смачивания при растекании жидкости в виде пленки значения площадей максимальны и равны. Для  $\theta_0 = 180^\circ$  при точечном контакте капли с твердой поверхностью межфазный слой жидкость – твердое вырождается в точку, а поверхность жидкость – газ приобретает форму сферы. Зависимость  $S_{lg}(\theta_0)$  имеет минимум



при  $\theta_0 = 90^\circ$ , что изменяет представление о сферической форме свободной поверхности капли. Сферическая форма характерна для свободной капли, не подверженной внешним воздействиям, в то время как в рассматриваемом случае на объект накладываются ограничения в виде межфазного слоя жидкость – твердое, искажающего форму.

Повышение гравитации, т.е. увеличение силы тяжести, приводит к сплющиванию сидячей капли и может быть реализовано либо за счет увеличения  $\theta_0$  при фиксированном  $S_{ls}$ , либо повышения  $S_{ls}$  при неизменном  $\theta_0$ , либо одновременным проявлением указанных факторов. Центр тяжести капли опускается, приближаясь к твердой поверхности, уменьшая значение потенциальной энергии системы. Полная энергия системы с учетом несжимаемости жидкости остается неизменной, что предполагает увеличение внутренней или свободной энергии, обусловленное образованием межфазных поверхностей. Работа силы тяжести в этом процессе должна быть равна работам сил поверхностного натяжения на перемещениях с изменением площадей межфазных поверхностей.

В табл. 1 представлены результаты расчета по изменению параметров сидячей капли в зависимости от значений краевого угла смачивания.

**Таблица 1.** Результаты расчета по изменению параметров сидячей капли в зависимости от значений краевого угла смачивания  
**Table 1.** Calculation results on the change of sitting droplet parameters depending on the values of the wetting edge angle

$\theta_0$	$R \cdot 10^3$ , [м]	$S_{lg} \cdot 10^6$ , [м <sup>2</sup> ]	$S_{ls} \cdot 10^6$ , [м <sup>2</sup> ]	$U_{lg} \cdot 10^6$ , [Н · м]	$U_{ls} \cdot 10^6$ , [Н · м]	$Z_c \cdot 10^3$ , [м]	$P_\gamma$ , [Па]	$Z_s \cdot 10^3$ , [м]	$\Delta A_G \cdot 10^8$ , [Н · м]
0	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	0	0	0
30°	4.26	15.27	14.25	1.07	0.86	3.94	32.86	0.25	1.03
90°	126	9.97	4.99	0.70	0	0.54	111.10	0.54	2.22
180°	1.00	12.56	0	0.88	0	0	140.00	1.00	4.11

Значение  $U_{ls} = 0$  при  $\theta_0 = 90^\circ$  обусловлено тем, что в этом случае, как будет показано далее, межфазный слой жидкость – твердое не образуется, а при  $\theta_0 = 180^\circ$  вырождается в точку. Сопоставление значений поверхностных энергий межфазных слоев при деформации капли с работой силы тяжести  $\Delta A_G$  показывает, что эти величины существенно отличаются. Так, переход системы из состояния с  $\theta_0 = 90^\circ$  в состояние с  $\theta_0 = 30^\circ$  сопровождается совершением работы внешней силой тяжести, равной

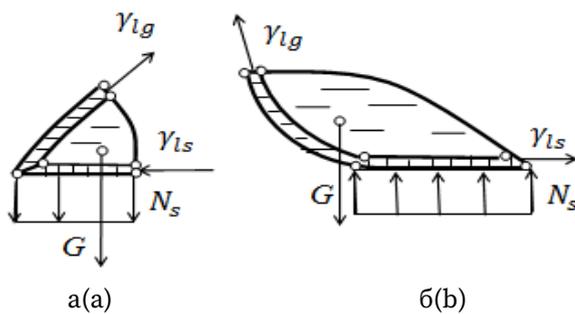
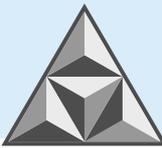
$$\Delta A_G = (1.03 - 2.22) \cdot 10^{-8} = -1.19 \cdot 10^{-8} \text{ Н} \cdot \text{м},$$

а суммарное изменение поверхностной энергии составляет

$$\Delta U = [(1.07 - 0.7) + 0.86] \cdot 10^{-6} = 1.23 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м},$$

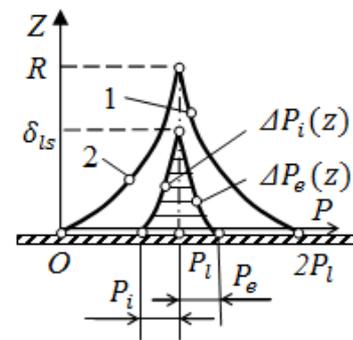
т.е. значения сопоставляемых величин отличаются на два порядка.

Причина обнаруженного несоответствия может состоять в ошибочном выборе традиционно используемого направления поверхностного натяжения жидкость – твердое  $\gamma_{ls}$  – из газовой фазы в жидкую. Смена направления этого силового фактора на противоположное снимает обнаруженное несоответствие, т.к. работа сил поверхностного натяжения, связанная с увеличением площади контакта  $S_{ls}$ , в этом случае будет отрицательной, уменьшая значение поверхностной энергии системы. Кроме того, отпадает необходимость использования поверхностного натяжения твердое – газ  $\gamma_{sg}$  в уравнении Юнга при рассмотрении равновесия линии трехфазного контакта (ЛТК).



**Рис. 3.** Внешние силовые факторы, приложенные к межфазным слоям:  $a - \theta_0 < 90^\circ$ ;  $b - \theta_0 > 90^\circ$

**Fig. 3.** External force factors applied to the interfacial layers:  $a - \theta_0 < 90^\circ$ ;  $b - \theta_0 > 90^\circ$



**Рис. 4.** Внутренние силовые факторы в межфазном слое жидкость – материал

**Fig. 4.** Internal force factors in the liquid – material interfacial layer

На рис. 3 показаны силовые факторы, действующие на область сидячей капли, граничащей с ЛТК. Здесь использованы обозначения:  $G$  – вес рассматриваемого объекта;  $N_s$  – реакция твердой поверхности. При  $\theta_0 < 90^\circ$  твердая фаза притягивает среду межфазного слоя, а поверхностное натяжение  $\gamma_{ls}$  работает как распорка, препятствующая сворачиванию межфазной поверхности  $S_{ls}$  под действием поверхностного натяжения  $\gamma_{lg}$ .

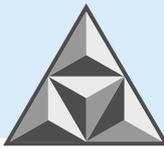
При  $\theta_0 > 90^\circ$  реакция  $N_s$  меняет направление на противоположное; твердая фаза стремится оттолкнуть межфазный слой, а  $\gamma_{ls}$  действует как растяжка, препятствующая увеличению площади  $S_{ls}$ .

Возвращаясь к вопросу об изменении форм сидячей капли с возрастанием гравитации, отметим, что трансформация капли по схеме (см. рис. 1, б) не предполагает увеличения межфазной поверхности жидкость – твердое в процессе деформации по следующей причине. Увеличение площади  $S_{ls}$  сопряжено со снижением поверхностной энергии, т.е. находится в противоречии с общей тенденцией. В соответствии с этим увеличение внутренней энергии осуществляется деформацией свободной поверхности капли с ростом площади  $S_{lg}$  при неизменном значении  $S_{ls}$ , т.е. реализуется вариант по схеме, представленной на рис. 1, б.

Для  $\theta_0 > 90^\circ$  возрастание внутренней энергии капли в процессе деформации происходит путем увеличения площади  $S_{ls}$ , при котором поверхностное натяжение  $\gamma_{ls}$  совершает положительную работу. Увеличение значения угла смачивания в этих условиях снижает поверхностную энергию системы, что противоречит условиям деформации, то есть реализуется вариант, представленный на рис. 1, а.

Проведенный анализ позволил установить общие закономерности образования и строения сидячей капли, а также определить направление изменений системы при внешнем силовом воздействии. В области значений краевого угла смачивания  $\theta_0 < 90^\circ$ , наиболее приемлемой для создания композиционных материалов, наблюдается противоречие принятым представлениям взаимодействия жидкой и твердой фаз в процессе формирования межфазных контактов, составляющих основу явления адгезии. Взаимодействие разнородных фаз осуществляется на молекулярном уровне в тонких межфазных слоях, которые часто рассматриваются как геометрические поверхности, т.е. объекты, не имеющие толщины. Изменение свойств системы в этом случае происходит скачкообразно при переходе из одной фазы в другую, а сам переход сопровождается изменением термодинамических параметров системы. Уравнения (1) и (2) в предыдущем разделе получены на основе таких представлений.

Однако такой подход не дает возможность судить о характере межфазных взаимодействий, позволяющем целенаправленно воздействовать на них с получением



запланированного результата. В соответствии с этим воспользуемся подходом, сформулированным в работах Б.В. Дерягина, представив контактную зону слоем конечной толщины – межфазным слоем с плавным изменением параметров. Рассмотрим межфазный слой жидкость – твердый материал как самостоятельный объект системы, к которому применимы условия равновесия механики сплошной среды. Специфика межфазных взаимодействий отражена использованием фактора внутреннего или молекулярного давления среды, а жидкая фаза предполагается несжимаемой.

Особенность межфазных слоев состоит в анизотропии тензора межфазных напряжений в соответствии с формулой Баккера (3), приводящей к возникновению специфического силового фактора – поверхностного натяжения, проявляемого в условиях межфазных взаимодействий. Представим тензор напряжений в межфазном слое жидкость – твердый материал совокупностью шаровой и девиаторной частей, в котором шаровая часть определяет давление, постоянное в модели несжимаемой жидкости и включающее три компоненты, равные внутреннему давлению жидкости в произвольной точке межфазного слоя:

$$P = P_{xx} = P_{yy} = P_{zz} = P_l.$$

Девиаторная часть тензора напряжений отвечает за деформацию среды, которая в модели несжимаемой жидкости осуществляется без изменения объема. Обозначим компоненты девиатора напряжений через  $\sigma'_{ij}$ , где индексы в обозначении определяют расположение контрольных площадок. Основное свойство девиатора напряжений состоит в равенстве нулю его первого инварианта, т.е. компоненты девиатора должны удовлетворять требованию:

$$\sigma'_{xx} + \sigma'_{yy} + \sigma'_{zz} = 0, \quad (7)$$

из которого следует, что добавка девиатора не отражается на шаровой части тензора напряжений, т.е. не приводит к изменению давления. Таким образом, тензор напряжений можно представить в виде:

$$A = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_l & 0 & 0 \\ 0 & P_l & 0 \\ 0 & 0 & P_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma'_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma'_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma'_{zz} \end{bmatrix},$$

так что

$$\sigma_{xx} = P_l + \sigma'_{xx}; \quad \sigma_{yy} = P_l + \sigma'_{yy}; \quad \sigma_{zz} = P_l + \sigma'_{zz}. \quad (8)$$

Введем декартову систему координат с осями  $OX$  и  $OY$ , расположенными в плоскости межфазного слоя, и осью  $OZ$ , перпендикулярной плоскости. Среда в межфазном слое находится под воздействием двух объемных фаз, ограничивающих его, причем каждая образует силовые поля, сформированные силами молекулярного притяжения различной интенсивности. Для равновесия межфазного слоя необходимо выполнение граничных условий в зоне контакта слоя с объемной жидкой фазой, сводящихся к требованиям:

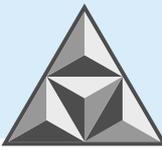
$$P = P_l; \quad \frac{dP}{dz} = 0,$$

где  $P_l$  – внутреннее давление в объемной фазе жидкости. Условия равновесия:

$$\frac{d\sigma_{zz}}{dz} = 0, \text{ т.е. } \sigma_{zz} = \text{const}, \quad (9)$$

должны выполняться в любой точке межфазного слоя.

Рассмотрим процесс формирования межфазного слоя как силовое воздействие твердой фазы на объемную фазу жидкости, граничащую с ней. Твердая стенка в условиях



удовлетворительного смачивания притягивает межфазный слой, приводя к повышению давления жидкости на поверхности твердой фазы на величину  $P_e$ . Тогда компонента  $\sigma_{zz}$  тензора напряжений в межфазном слое запишется:

$$\sigma_{zz} = P_l + P_e + \sigma'_{zz}. \quad (10)$$

Для удовлетворения граничных условий (3) необходимо выполнение требования  $\sigma_{zz} = P_l$ .

Внутреннее давление  $P_l$  определяется свойствами жидкости, образуя уравновешенное поле, в котором дальнедействующие силы молекулярного притяжения уравновешиваются силами отталкивания, обусловленными столкновениями молекул.

Из положений механики [18] известно, что уравновешенную систему сил можно присоединять или исключать из действующей системы сил, не нарушая равновесия системы. Таким образом, давление  $P_l$  может быть исключено из выражений (2) при записи уравнений равновесия. Тогда тензор межфазных напряжений будет содержать только девиаторные компоненты при значении  $\sigma_{zz} = 0$ . С учетом симметрии системы относительно оси OZ и свойств девиатора (1), компоненты тензора напряжений (2) будут равны:

$$\sigma'_{zz} = -P_e; \quad \sigma'_{xx} = \sigma'_{yy} = \frac{P_e}{2}. \quad (11)$$

Далее воспользуемся известным в механике соотношением [18]:

$$P = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3}, \quad (12)$$

в котором  $P = P_e$ , а значения компонент тензора межфазных напряжений составят:

$$\sigma_{zz} = 0; \quad \sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{3P_e}{2}. \quad (13)$$

Таким образом, контактное взаимодействие жидкой и твердой фаз сводится к напряжениям  $\sigma_{xx}$  и  $\sigma_{yy}$ , действующим в плоскости межфазного слоя и формирующим поверхностное натяжение  $\gamma_{ls}$ . По нормали к поверхностному слою напряжения постоянны в каждой точке межфазного слоя и составляют  $P_l$ .

Параметр  $P_e$  определяет давление жидкости на границе межфазного слоя с твердой поверхностью строительного материала, то есть является внешним силовым фактором по отношению к межфазному слою. Однако компоненты тензора (2) определяют напряжения среды, действующие внутри межфазного слоя, и являются для него внутренними силовыми факторами, сумма которых в соответствии со свойством внутренних сил должна быть равна нулю. Из этого следует, что в межфазном слое должны присутствовать силовые факторы, уравновешивающие рассмотренные напряжения, определяемые выражением (2). Такими факторами являются напряжения, создаваемые воздействием на межфазный слой объемной фазы жидкости.

Введем в рассмотрение параметр  $P_i$ , равный давлению жидкости на границе межфазного слоя с объемной фазой жидкости, значение которого составляет  $P_i = P_l$ . Параметры  $P_e$  и  $P_i$  определяют давления среды в граничных точках межфазного слоя, являясь для него внешними силовыми факторами. Воздействие объемных фаз на межфазный слой формирует внутренние силовые поля  $\Delta P_e(z)$  и  $\Delta P_i(z)$  с напряжениями, зависящими от положения точки, то есть координаты  $z$ . С учетом свойств внутренних сил системы, в каждой точке межфазного слоя должно выполняться условие:

$$\Delta P_e(z) + \Delta P_i(z) = 0, \quad (14)$$

из которого вытекает равенство значений напряжений и противоположность их направлений.

Рассматриваемые силовые поля формируются дальнедействующими силами межмолекулярного притяжения, значения которых максимальны в граничных точках



межфазного слоя, убывая по мере удаления от них. На рис. 4 показано распределение этих зависимостей по толщине межфазного слоя. Кривые 1 и 2 построены в предположении абсолютного смачивания жидкостью твердой поверхности для  $\theta_0 = 0$ , т.е. включают все возможные варианты межфазного взаимодействия. При значениях краевого угла смачивания, отличных от нуля, интенсивность воздействия твердой фазы на жидкость ослабевает, что приводит к уменьшению области определения функций до значения толщины межфазного слоя  $\delta_{ls} < R$ . Тем не менее граничные условия в зоне контакта межфазного слоя с объемной фазой жидкости остаются неизменными, что отражено на рисунке зависимостями  $\Delta P_e(z)$  и  $\Delta P_i(z)$ .

Распределение давления  $\Delta P_i(z)$  не зависит от условий смачивания жидкостью твердой поверхности, а определяется свойствами жидкой фазы, то есть зависимостью сил молекулярного притяжения от расстояния в пределах радиуса дальнего действия  $R$ . Для удовлетворения условия (8) необходимо, чтобы зависимость  $\Delta P_e(z)$  была симметрична распределению  $\Delta P_i(z)$  относительно оси  $P = P_i$ .

При выводе приведенных соотношений использовано правило знаков напряжений, принятое в теории Ван-дер-Ваальса: положительными считаются сжимающие напряжения. Из этого следует, что напряжения  $\sigma_{xx}$  и  $\sigma_{yy}$  в выражении (9) являются сжимающими, т.е. поверхностное натяжение  $\gamma_{ls}$  направлено из жидкости в газовую фазу, подтверждая ранее сформированное представление на основе анализа деформации капли.

Тензор межфазных напряжений (9) обеспечивает выполнение требования  $\sigma_{zz} = \text{const}$ , но содержит неизвестный параметр  $P_e$ , значение которого определяется условиями смачивания, то есть зависят от значения  $\theta_0$ . Для выявления этой зависимости воспользуемся понятием объемной силы, возникающей под действием градиента давления в зависимости  $\Delta P_e(z)$ . Объемная сила  $F_V$  в механике определяется как отношение силы  $\Delta F$ , приложенной к малому элементу среды, к массе этого элемента  $\Delta m$  и выражается зависимостью [18]:

$$F_V = \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dz}, \quad (15)$$

где  $\rho$  – плотность среды,  $P$  – давление. В зоне контакта межфазного слоя с твердой поверхностью материала возникает особенная ситуация, влияющая на процесс адгезии и вызванная отличием свойств контактирующих сред.

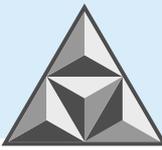
Для подвижной жидкой среды межфазного слоя деформации объема в любом направлении не ограничены, что позволяет реализовать присутствующие в выражении (2) компоненты дивергента напряжений, получив давление, включающее три равные по величине составляющие  $P_e$ . Для твердой фазы с фиксированным положением молекул такая возможность исключается, в результате чего реакция твердой поверхности  $N_s$  на межфазный слой сведется к одной компоненте, нормальной к поверхности. Пользуясь выражением (8) для определения значения  $N_s$ ,

$$P = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3}; P_e = \frac{N_s}{3}; N_s = 3P_e,$$

то есть реакция поверхности твердого материала на жидкость будет в три раза превышать межфазное давление жидкости в области контакта фаз.

Выделим элемент межфазного слоя в форме параллелепипеда, одно из ребер которого равно толщине межфазного слоя  $\delta_{ls}$ , а два других формируют грань площадью  $S$ . Запишем уравнение равновесия элемента в проекции на ось  $Z$  с учетом выражения (11):

$$N_s \cdot S = F_V \cdot \Delta m = F_V \cdot \rho \cdot S \cdot \delta_{ls},$$



откуда получим

$$\frac{d\Delta P_e}{dz} \cdot \delta_{ls} = 3P_e. \quad (16)$$

Для заданной жидкости параметр  $\delta_{ls}$  определяется условиями смачивания и может принимать значения в интервале  $R \geq \delta_{ls} \geq 0$ , в зависимости от краевого угла смачивания  $\theta_0$ . Это позволяет рассматривать  $\delta_{ls}$  как независимую переменную  $z$ , а  $P_e$  как текущее значение  $\Delta P_e(z)$  в рассматриваемой точке межфазного слоя. Таким образом, уравнение (12) преобразуется в уравнение с разделяющимися переменными

$$\frac{d\Delta P_e}{\Delta P_e} = 3 \frac{dz}{z} \text{ с решением } \Delta P_e = C (z)^3,$$

где  $C$  – константа интегрирования, значение которой может быть определено из граничного условия на твердой стенке при абсолютном смачивании жидкостью твердой поверхности, когда  $\delta_{ls} = R$ .

Выберем начало отсчета координаты  $z$  на границе межфазного слоя с объемной фазой жидкости в связи с тем, что граничные условия в этой точке остаются неизменными при любых условиях смачивания. При абсолютном смачивании граничные условия на твердой поверхности запишутся при  $z = R$ :  $\Delta P_e = P_e = P_l$ , а решение дифференциального уравнения (12) предстает в виде:

$$\Delta P_e = P_l \left(\frac{z}{R}\right)^3. \quad (17)$$

Зависимость (17) содержит два экспериментальных параметра:  $P_l$  – внутреннее давление жидкости;  $R$  – радиус дальнего действия молекул жидкости. Внутреннее давление определяется экспериментально исследованием сжимаемости жидкости, и по данным различных литературных источников, составляет для воды от 10000 до 15000 атм. [8, 11]. Значения радиуса дальнего действия в известной литературе приводятся только на уровне оценок, которые могут существенно отличаться друг от друга [19, 20].

Проведенное исследование позволяет определить поверхностное натяжение межфазного слоя жидкость – твердый материал для  $\theta_0 = 0$  с использованием компонент тензора (10) и уравнения Баккера, которое может быть приведено к виду:

$$\gamma_{ls} = \gamma_{lg} = \int_0^R \sigma_{xx} dz = \frac{3}{8} P_l R.$$

Полученное выражение определяет поверхностное натяжение межфазного слоя жидкость – твердое  $\gamma_{ls}$  для случая абсолютного смачивания, когда его толщина равна радиусу дальнего действия молекул жидкости  $R$ .

Тогда

$$R = \frac{8 \gamma_{lg}}{3 P_l}.$$

Приведенный результат для абсолютного смачивания практически реализуется крайне редко. Однако соотношения позволяют описать структуру межфазного слоя жидкость – твердый материал для любых значений краевого угла смачивания с использованием зависимости (11) при  $z = \delta$ .

$$\Delta P_e = \Delta P_\delta = P_l \left(\frac{\delta}{R}\right)^3.$$

Толщина межфазного слоя  $\delta$  может быть определена путем следующих преобразований:

$$\gamma_{ls} = \int_0^\delta \sigma_{xx} dz = \int_0^\delta \frac{3}{2} \Delta P_e \cdot dz = \frac{3}{8} \frac{P_l}{R^3} \delta^4.$$



С другой стороны, поверхностное натяжение  $\gamma_{ls}$  может быть найдено из равновесия ЛТК в предположении  $\gamma_{sg} = 0$ :

$$\gamma_{ls} = \gamma_{lg} \cos \theta_0.$$

Приравнивая записанные выражения, получаем:

$$\delta^4 = \left(\frac{8\gamma_{lg}}{3P_0}\right)^4 \cos^4 \theta_0; \quad \delta = R(\cos \theta_0)^{0,25}; \quad \Delta P_\delta = P_l (\cos \theta_0)^{0,25}. \quad (18)$$

Таким образом, воздействие твердой поверхности на межфазный слой приводит к возникновению дополнительного нормального напряжения на твердой стенке  $\Delta P_\delta$ , в результате чего, без учета давления  $P_l$ , полное напряжение в этой области составит:

$$P_\delta = P_l [1 + (\cos \theta_0)^{0,25}]. \quad (19)$$

Напряжение  $P_\delta$  является фактором, определяющим адгезию жидкости к поверхности материала, т.е. прочность контакта твердой и жидкой фаз. Прочность жидкости зависит от внутреннего давления  $P_l$ , значение которого одинаково, как показано выше, в каждой точке межфазного слоя, включая точки контакта фаз. Исходя из этого, множитель в квадратной скобке связан с повышением прочности межфазной связи вследствие адгезии. Сопоставим полученную зависимость с уравнением Дюпре-Юнга (2), определяющим работу адгезии  $W_a$ :

$$W_a = \gamma_{lg}(1 + \cos \theta_0). \quad (20)$$

Структуры сопоставляемых уравнений аналогичны, то есть множитель в скобках в уравнении (17) связан с повышением прочности среды межфазного слоя. Проведем сопоставление с результатами, полученными по уравнению Дюпре-Юнга. Превышение прочности связи адгезионного соединения над прочностью когезионных сил жидкости связано с добавками к единице в скобках записанных уравнений. Сравнение значений этих добавок приведено в табл. 2.

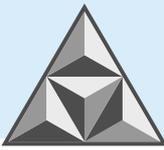
**Таблица 2.** Сопоставление результатов расчета

**Table 2.** Comparison of calculation results

$\theta_0$	90°	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
$(\cos \theta_0)^{0,25}$	0	0.65	0.76	0.84	0.90	0.94	0.96	0.98	1.00
$\cos \theta_0$	0	0.17	0.34	0.50	0.64	0.77	0.87	0.94	0.98

Из табл. 2 видно, что наиболее сильно адгезия проявляется при малых значениях краевых углов смачивания  $\theta_0$  в условиях близких к абсолютному смачиванию, когда прочность связи возрастает в два раза. Однако интенсивность изменения сопоставляемых величин существенно отличается – в области значений  $\theta_0 < 60^\circ$  эффект адгезии незначительно зависит от значения  $\theta_0$ , что подтверждается экспериментальными данными [21], а в уравнении Дюпре-Юнга такая особенность отсутствует.

Причина обозначенного расхождения может состоять в ошибочности исходных посылок при выводе уравнения Дюпре-Юнга, связанных с образованием новых поверхностей после разрыва адгезионного контакта. Этим объясняется повышение прочности адгезионной связи. При анализе энергетических затрат с изменением условий смачивания показано, что формирование межфазной поверхности  $S_{ls}$  происходит при совершении отрицательной работы поверхностного натяжения  $\gamma_{ls}$ , т.е. образование новой поверхности должно сопровождаться уменьшением поверхностной энергии системы. В соответствии с этим справедливость уравнения (18) остаются под вопросом.



## ДИСКУССИОННЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

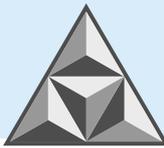
Рассмотренные результаты ставят под сомнение некоторые сложившиеся положения теории поверхностных явлений, а иногда находятся в противоречии с ними. В соответствии с этим возникает необходимость дополнительных пояснений к выдвинутым в работе новым положениям. Прежде всего обратимся к проблеме моделирования эффекта адгезии, составляющего основу производства композиционных материалов. Разработанный подход объясняет механизм возникновения эффекта, как формирование в системе напряжений, превышающих когезионные и действующие на поверхности твердой фазы, обеспечивая сцепление. При этом внутреннее давление среды  $P_l$ , обусловленное действием сил молекулярного притяжения или когезионных сил, остается постоянным в каждой точке межфазного слоя, обеспечивая его равновесие.

Этот неочевидный, на первый взгляд, результат, связан с учетом анизотропии тензора напряжений в межфазном слое и разделением силовых факторов системы на внешние и внутренние. Под внешними силами в механике понимают силы воздействия на рассматриваемую систему со стороны объектов, не входящих в ее состав. Внутренние силы обеспечивают взаимодействие между элементами системы таким образом, чтобы их сумма равнялась нулю. В соответствии с этим при рассмотрении равновесия межфазного слоя напряжения, определяемые тензором (2), отнесены к классу внутренних силовых факторов. Равенство нулю их суммы обеспечивается условием (10) по схеме, представленной на рис. 4.

Внешними по отношению к межфазному слою будут воздействия  $P_e$  и  $P_i$  со стороны объемных фаз, приложенные к граничным поверхностям межфазного слоя, а также напряжения  $\sigma_{xx}$  и  $\sigma_{yy}$  в выражениях (8), формирующие поверхностное натяжение  $\gamma_{ls}$ . Совокупность внешних силовых факторов, приложенных к выделенному элементу сидячей капли, показана на рис. 3. Ограничимся рассмотрением внешних сил, показанных на рис. 3, а, т.к., с точки зрения разработки композиционных материалов, эта схема представляет большой интерес. Приведенные на рисунке силовые факторы отражают воздействие на рассматриваемый элемент среды выведенной из рассмотрения части сидячей капли.

Поверхностное натяжение  $\gamma_{lg}$ , в соответствии с приведенным на рисунке направлением, препятствует, с одной стороны, сокращению межфазной поверхности, понижающему значение внутренней энергии системы, а с другой – поступлению жидкости в область разрежения, возникающую при контакте с газовой фазой. Поверхностное натяжение  $\gamma_{ls}$  ограничивает увеличение межфазной поверхности, связанное со снижением внутренней энергии системы, а также предотвращает выдавливание жидкости из области повышенного давления, создаваемого твердой поверхностью.

Направление опорной реакции  $N_z$  определяется действием объемных сил, возникающих вследствие градиента давления в распределении  $\Delta P_e(z)$ . В данном случае объемные силы в межфазном слое направлены в сторону твердой поверхности, обеспечивая притяжение межфазного слоя, формирующего адгезию. Несмотря на то что объемные силы формируются в межфазном слое, являясь внутренними силами, их действие приводит к возникновению опорной реакции и других внешних сил, показанных на рис. 3. Таким образом, специфика поверхностных явлений связана с образованием градиента давления, значение которого, с учетом высоких значений внутренних давлений и малой толщины межфазного слоя, может достигать огромных величин.



Обоснованное изменение направления поверхностного натяжения  $\gamma_{ls}$  в сторону, противоположную общепринятой, влечет за собой изменения в известном уравнении Юнга:

$$\gamma_{sg} = \gamma_{ls} + \gamma_{lg} \cdot \cos\theta_0.$$

Поверхностное натяжение твердый материал – газ  $\gamma_{sg}$  было введено в связи с нарушением условий равновесия линии трехфазного контакта для значений  $\theta_0 < \pi/2$ . Выбор традиционного направления поверхностного натяжения, независимо от вида межфазного слоя, и характера смачивания в межфазном слое жидкость – твердый материал, обусловлен предположением о когезионном механизме образования поверхностного натяжения, но в работе показан градиентный механизм его возникновения.

Физическая сторона поверхностного натяжения твердый материал – газ  $\gamma_{sg}$  основана на предположении о мономолекулярной структуре этого межфазного слоя [22], в которой образование градиентов давления, формирующих поверхностное натяжение, скорее всего, невозможно. Кроме того, не приводятся данные о площади этой межфазной поверхности, необходимой для определения работы адгезии. Методы экспериментального определения параметра  $\gamma_{sg}$  к настоящему времени не сформулированы, что ставит под сомнение факт его существования. Остается непонятным, каким образом рассматриваемый межфазный слой стыкуется с линией трехфазного контакта сидячей капли при толщине слоя в одну молекулу. На наш взгляд, представленные доводы достаточны для исключения поверхностного натяжения, т.е.  $\gamma_{sg} = 0$ . Этот результат использован в настоящей работе.

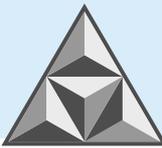
В материалах работы показано, что форма сидячей капли в виде полусферы обладает минимальным значением поверхностной энергии, в связи с чем в зависимости поверхностной энергии системы от краевого угла смачивания появляется минимум. При значении  $\theta_0 = \pi/2$  межфазный слой жидкость – твердый материал не образуется, так как давления в объемных фазах, ограничивающих межфазный слой, одинаковы и образование переходной зоны не требуется.

Приведенные соображения подтверждают правомерность использованных положений и открывают широкие перспективы к дальнейшему изучению поверхностных явлений на границе строительного материала и развитию положений, изложенных ранее в [17, 23, 24]. Отличительной особенностью разработанного подхода является независимость полученных результатов от механизмов межфазных взаимодействий, круг которых чрезвычайно широк. Таким образом, в ходе проведенного исследования разработан принципиально новый подход к моделированию поверхностных явлений, основанный на использовании аппарата механики сплошной среды и пригодный к применению вне зависимости от природы сил, формирующих межфазные взаимодействия.

## ВЫВОДЫ

Проведено теоретическое обоснование использования внутреннего давления жидкости при моделировании явлений на твердой поверхности строительного материала. Установлено, что формой поверхности сидячей капли с минимальным запасом поверхностной энергии является полусфера. Реализовано предположение Б.В. Дерягина о возможности замены различных видов межфазных взаимодействий системой межфазных натяжений.

Показано, что работа сил поверхностного натяжения жидкость – твердый строительный материал при образовании межфазной поверхности и значениях краевого угла смачивания



$\theta_0 < \pi/2$  отрицательна. При моделировании поверхностных явлений на границе твердый материал – газ указано на несостоятельность использования поверхностного натяжения.

Разработан тензор напряжений в межфазном слое жидкость – твердый строительный материал, представленный совокупностью шаровой и девиаторной частей. Установлен нелинейный характер распределения напряжений в таком межфазном слое, приводящий к формированию мощных градиентов давления по его толщине и определяющий специфику поверхностных явлений.

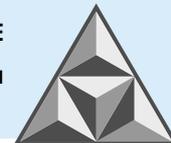
## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Ролдугин В.И., Харитонов Т.В.** Механизм действия и место приложения капиллярных сил // *Коллоид. журнал*. 2017. Т. 79, № 4. С. 493-501. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29404302>
2. **Русанов А.И.** Коллоидно-химические и оптические свойства наноструктур, межфазных слоев и пористых тел // *Коллоид. журн.* 2012. Т. 74, № 2. С. 148.
3. **Durand M.** Mechanical approach to surface tension and capillary phenomena // *Amer. J. Phys.* 2021. Vol. 89. P. 261-266.
4. **Дерягин Б.В.** Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок. М.: Наука, 1986. 206 с.
5. **Роулинсон Дж., Уидом Б.** Молекулярная теория капиллярности. М.: Мир, 1986. 375 с.
6. **Френкель Я.И.** Кинетическая теория жидкостей. Л.: Наука, 1975. 592 с.
7. **Колесников И.М.** Термодинамика физико-химических процессов. М.: Акад. им. И.М. Губкина, 1992. 289 с.
8. **Мелвин-Хьюз Э.А.** Физическая химия. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 537 с.
9. **Карцев В.Н., Штыков С.Н., Панкин К.Е., Батов Д.В.** Молекулярные силы и внутреннее давление жидкостей // *Журнал структ. хим.* 2012. Т. 53, № 6. С. 1113-1118.
10. **Bakker G.** Kapillarität und Oberflächenspannung: Handbuch der Experimentalphysik. Leipzig: Akadem. Verlagsgesellschaft, 1928. 458 p.
11. **Harashima A.**, Molecular Theory of Surface Tension // *Adv. Chem. Phys.*, Vol. 1, New York: Yale University Press, 1958. 326 p.
12. **Малинин Н.Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.
13. **Ababneh A., Amirfazli A., Elliott J.W.** Effect of Gravity on the Macroscopic Advancing Contact Angle of Sessile Drops // *Canad. J. Chem. Eng.* 2006. Vol. 84. P. 39-43.
14. Brutin D., Zhu Z.Q., Rahli O. Sessile Drop in Microgravity: Creation, Contact Angle and Interface // *Microgravi Sci. Technol.* 2009. Vol. 21, no. 1. P. 107-114.
15. **Abel G., Ross G.G., Andrzejewski L.** Transformation of a disturbed sitting drop // *Adv. Space Res.* 2004. Vol. 33, no. 8. P. 1431-1438.
16. **Кабов О.А., Зайцев Д.В.** Влияние гистерезиса смачивания на растекание капли под действием гравитации // *Докл. Акад. наук*. 2013. Т. 451, № 1. С. 37-40.
17. **Ignatyev A.A., Gotovtsev V.M.** Transformation of gisturbed sittin drop // *Умные композиты в строительстве*. 2020. Т. 1, вып. 1. С. 39-43. URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1\\_2020](http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020)
18. **Лойцянский Л.Г.** Механика жидкости и газа: учебник. М.: Наука, 1978. 840 с.
19. **Каплан И.Г.** Введение в теорию межмолекулярных взаимодействий. М.: Наука, 1982. 312 с.
20. **Русанов А.И.** Фазовые равновесия и поверхностные явления. Л.: Химия, 1967. 388 с.
21. **Verkholomov V.K.** Two Concepts While Determining Contact Angle Value // *Modern Sci.* 2017. No. 1. P. 8-13.
22. **Товбин, Ю.К.** Теория физико-химических процессов на границе газ – твердое тело. М.: Наука, 1990. 288 с.
23. **Ignatyev A.A., Gotovtsev V.M., Razgovorov P.B.** Theoretical background for simulation of physical processes in the interfacial layer «solid-liquid» // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. Vol. 1889. P. 022077. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/2/022077
24. **Ignatyev A.A., Gotovtsev V.M., Razgovorov P.B.** Theoretical background for simulation of the interfacial layer «liquid-gas» // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. Vol. 1889. P. 022088. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/2/022088

Поступила в редакцию 26.10.2023

Одобрена после рецензирования 05.12.2023

Принята к опубликованию 12.12.2023



## REFERENCES

1. **Roldugin, V.I. & Kharitonova, T.V.** (2017) Action mechanism and place of capillary forces application, *Colloid. J.*, 79(4), pp. 493-501 [online]. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29404302> (in Russian).
2. **Rusanov, A.I.** (2012) Colloid-chemical and optical properties of nanostructures, interfacial layers and porous bodies, *Colloid. J.*, 74(2), pp. 148 (in Russian).
3. **Durand, M.** (2021) Mechanical approach to surface tension and capillary phenomena, *Amer. J. Phys.*, 89, pp. 261-266.
4. **Deryagin, B.V.** (1986) *Theory of colloids and thin films stability*. M.: Nauka (in Russian).
5. **Rawlinson, J. & Widom, B.** (1986) *Molecular theory of capillarity*. M.: Mir (in Russian).
6. **Frenkel, Ya.I.** (1975) *Kinetic theory of liquids*. L.: Nauka (in Russian).
7. **Kolesnikov, I.M.** (1992) *Thermodynamics of physical and chemical processes*. Moscow: Akad. im. I.M. Gubkina (in Russian).
8. **Melvin-Hughes, E.A.** (1962) *Physical Chemistry*. Moscow: Izd-vo inostr. lit. (in Russian).
9. **Kartsev, V.N., Shtykov, S.N., Pankin, K.E. & Batov, D.V.** (2012) Molecular forces and internal pressure of liquids, *J. Struct. Chem.*, 53(6), pp. 1113-1118 (in Russian).
10. **Bakker, G.** (1928) *Kapillarität und Oberflächenspannung: Handbuch der Experimentalphysik*. Leipzig: Akadem. Verlagsgesellschaft.
11. **Harashima, A.** (1958) Molecular Theory of Surface Tension, *Advances in Chemical Physics*, (1), New York: Yale University Press.
12. **Malinin, N.N.** (1975) *Applied theory of plasticity and creep*. M.: Mashinostroenie (in Russian).
13. **Ababneh, A., Amirfazli, A. & Elliott, J.W.** (2006) Effect of Gravity on the Macroscopic Advancing Contact Angle of Sessile Drops, *Canad. J. Chem. Eng.*, 84, pp. 39-43.
14. **Brutin, D., Zhu, Z.Q. & Rahli, O.** (2009) Sessile Drop in Microgravity: Creation, Contact Angle and Interface, *Micrograviti Sci. Technol.*, 21(1), pp. 107-114.
15. **Abel, G., Ross, G.G. & Andrzejewski, L.** (2004) Transformation of a disturbed sitting drop, *Adv. Space Res.*, 33(8), pp. 1431-1438.
16. **Kabov, O.A. & Zaitsev, D.V.** (2013) Influence of wetting hysteresis on the drop spreading under the gravity effect, *Dokl. Akad. nauk*, 451(1), pp. 37-40 (in Russian).
17. **Ignatyev, A.A. & Gotovtsev, V.M.** (2020) Transformation of a disturbed sitting drop, *Smart Composite in Construction*, 1(1), pp. 39-43 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1\\_2020](http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020) (accessed 10.10.2023) (in Russian).
18. **Loytsyanskiy, L.G.** (1978) *Mechanics of fluid and gas: textbook*. Moscow: Nauka (in Russian).
19. **Kaplan, I.G.** (1982) *Introduction to the theory of intermolecular interactions*. Moscow: Nauka (in Russian).
20. **Rusanov, A.I.** (1967) *Phase equilibria and surface phenomena*. L.: Khimiya (in Russian).
21. **Verkholomov, V.K.** (2017) Two Concepts While Determining Contact Angle Value, *Modern Sci.*, (1), pp. 8-13.
22. **Tovbin, Yu.K.** (1990) *Theory of physical and chemical processes at the gas-solid boundary*. M.: Nauka (in Russian).
23. **Ignatyev, A.A., Gotovtsev, V.M. & Razgovorov, P.B.** (2021) Theoretical background for simulation of physical processes in the interfacial layer «solid-liquid», *J. Phys.: Conf. Ser.*, (1889), pp. 022077. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/2/022077.
24. **Ignatyev, A.A., Gotovtsev, V.M. & Razgovorov, P.B.** (2021) Theoretical background for simulation of the interfacial layer «liquid-gas», *J. Phys.: Conf. Ser.*, (1889), pp. 022088. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/2/022088.

Received 26.10.2023

Approved after reviewing 05.12.2023

Accepted 12.12.2023



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 69.05:691

# Учет энергоемкости строительных материалов в течение жизненного цикла объектов капитального строительства

**Л.А. Опарина\*, В.А. Огурцов**

**Людмила Анатольевна Опарина, Валерий Альбертович Огурцов**

Ивановский государственный политехнический университет, Иваново, Российская Федерация

*L.A.Oparina@gmail.com\**, *ogurtzovvawork@mail.ru*



*В производстве строительных материалов, при осуществлении строительно-монтажных работ, на эксплуатацию с текущими и капитальными ремонтами, реконструкцию, демонтаж, утилизацию и рециклинг расходуются большие энергоресурсы. Как правило, эти энергоресурсы являются невозобновляемыми, поэтому в целях энергосбережения необходимо учитывать суммарный расход энергии на объектах капитального строительства в течение их жизненного цикла. Для расчета затрат энергоресурсов авторами предложена структура реляционной базы данных энергоемкости строительных материалов. Предлагаемая база данных содержит перечень строительных материалов и значения энергоемкости на всех стадиях жизненного цикла. Новизной базы данных является разделение материалов по элементам здания (сменяемые, несменяемые). Представлены фрагменты расчета энергоемкости жизненного цикла многоквартирного дома в городе Иваново с использованием предлагаемой базы данных.*

**Ключевые слова:** строительные материалы, энергоемкость, жизненный цикл, информационный ресурс, база данных

**Для цитирования:**

Опарина Л.А., Огурцов В.А. Учет энергоемкости строительных материалов в течение жизненного цикла объектов капитального строительства // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 4. С. 50-60. URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4_2023)



SCIENTIFIC ARTICLE

# Consideration of construction materials energy intensity during the capital construction objects life cycle

**L.A. Oparina\*, V.A. Ogurtsov**

**Lyudmila A. Oparina, Valeriy A. Ogurtsov**

Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russian Federation

*L.A.Oparina@gmail.com\**, *ogurtzovvawork@mail.ru*



*Considerable energy resources are consumed in the production of building materials, during construction and installation works, for operation with current and major repairs, reconstruction, dismantling, utilisation and recycling. As a rule, these energy resources are non-renewable, therefore, for energy saving purposes, it is necessary to take into account the total energy consumption of capital construction facilities during their life cycle. The authors have proposed the structure of a relational database of building materials energy intensity to calculate energy costs. The proposed database contains a list of building materials and energy intensity values at all stages of the life cycle. The novelty of the database is the division of materials by building elements (replaceable, non-replaceable). The article presents fragments of energy intensity calculation of the apartment building life cycle in the Ivanovo city using the proposed database.*

**Key words:** building materials, energy intensity, life cycle, information resource, database

**For citation:**

Oparina, L.A. & Ogurtsov, V.A. (2023) Consideration of construction materials energy intensity during the capital construction objects life cycle, *Smart Composite in Construction*, 4(4), pp. 50-60 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4_2023)



## ВВЕДЕНИЕ

Эффективность строительства зависит от продолжительности жизненного цикла городов, поселков и сельских населенных пунктов, их устойчивости и приспособляемости к условиям внешней среды, а также уровня развития технического прогресса. Для увеличения жизненного цикла городов и поселений, их устойчивого развития необходимо строить долговечные, экологически чистые здания с минимальным потреблением энергии и длительным сроком службы, а также учитывать энергоемкость жизненного цикла зданий [1, 2].

Многолетние авторские исследования по данной теме показали, что в энергоемкость жизненного цикла зданий наибольший удельный вес вносят строительные материалы, конструкции и изделия [3]. При этом лидерами в потреблении энергии, безусловно, являются промышленные предприятия по производству строительных материалов, изделий и конструкций. Строительная отрасль нашей страны ежегодно расходует энергетические ресурсы величиной порядка 60 млн. т. условного топлива (т.у.т.), а также 40 млрд. кВт·ч электроэнергии, что составляет около 60% от добываемых и расходуемых на внутренние нужды топливно-энергетических ресурсов. Самым энергоемким является производство стали (32290 МДж тепловой энергии на 1 т), цемента (28 млн. т.у.т.), керамического кирпича (13 млн. т.у.т.), требующее работы печей с высоким температурно-влажностным режимом. Бетон и железобетон являются менее энергоемкими [4]. Энергоемкость производства шлакопемзогазобетона составляет 240 кг у.т./м<sup>3</sup>, как и пемзобетона и шлакопемзобетона (240 кг у.т./м<sup>3</sup>), производства бетона на гранулированных шлаках, топливных (котельноугольных) шлаках и зольном гравии – 195 кг у.т./м<sup>3</sup>, а производства газобетона, газо- и золотенобетона – 58.2 кг у.т./м<sup>3</sup>.

Технологические процессы добычи и производства строительных материалов также требуют значительных затрат энергоресурсов. Приходится констатировать, что энергозатраты на единицу продукции нерудных строительных материалов в России превышают уровень аналогичных мировых производителей [5]. В процессе строительства, а также демонтажа зданий образуется много строительных отходов – лом железобетона, асфальта, обрезки кабелей и труб, гипсокартонные обрезки, бой кирпича и стекла, древесина, пластмассы, асбестовый шифер, утеплитель, рубероид и др. [6]. Технологические процессы рециклинга и утилизации строительных материалов также являются энергоемкими.

Таким образом, при выборе строительных материалов, изделий и конструкций для проектирования тепловой защиты зданий и проведении многовариантных расчетов необходимо учитывать не только экологичность, долговечность, теплозащитные характеристики, но и энергоемкость [7].

Сложность учета энергоемкости строительных материалов, изделий, конструкций и технологических процессов жизненного цикла строительных объектов заключается в том, что данные для проведения таких расчетов являются в настоящее время разрозненными, никаким образом не систематизированными.



Единый информационный ресурс, который содержал бы верифицированные данные для расчета энергоемкости жизненных циклов строительных объектов с постоянной поддержкой в едином цифровом формате, отсутствует. Поэтому поставленная цель разработки подобного информационного ресурса является актуальной и значимой для строительной отрасли страны.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В процессе работы над созданием информационного ресурса для расчета энергоемкости жизненного цикла строительных объектов авторами использовался системный подход, а именно: жизненный цикл строительных объектов представлен в виде системы, в течение срока жизни которой объекты испытывают трансформации.

На каждом этапе через систему проходит поток строительных материалов, изделий и конструкций. Эти потоки планируются на этапе проектирования и видоизменяются в процессе строительства, эксплуатации и ремонтов, реконструкции. В конце жизненного цикла материалы, изделия и конструкции трансформируются для демонтажа, подвергаются утилизации и рециклингу. На производство материалов и технологические процессы их трансформации необходимо затратить определенные энергоресурсы. Эти затраты энергоресурсов должны учитываться при определении полной энергоемкости жизненного цикла зданий как системы и строительных материалов, изделий и конструкций как подсистемных объектов (рис. 1).

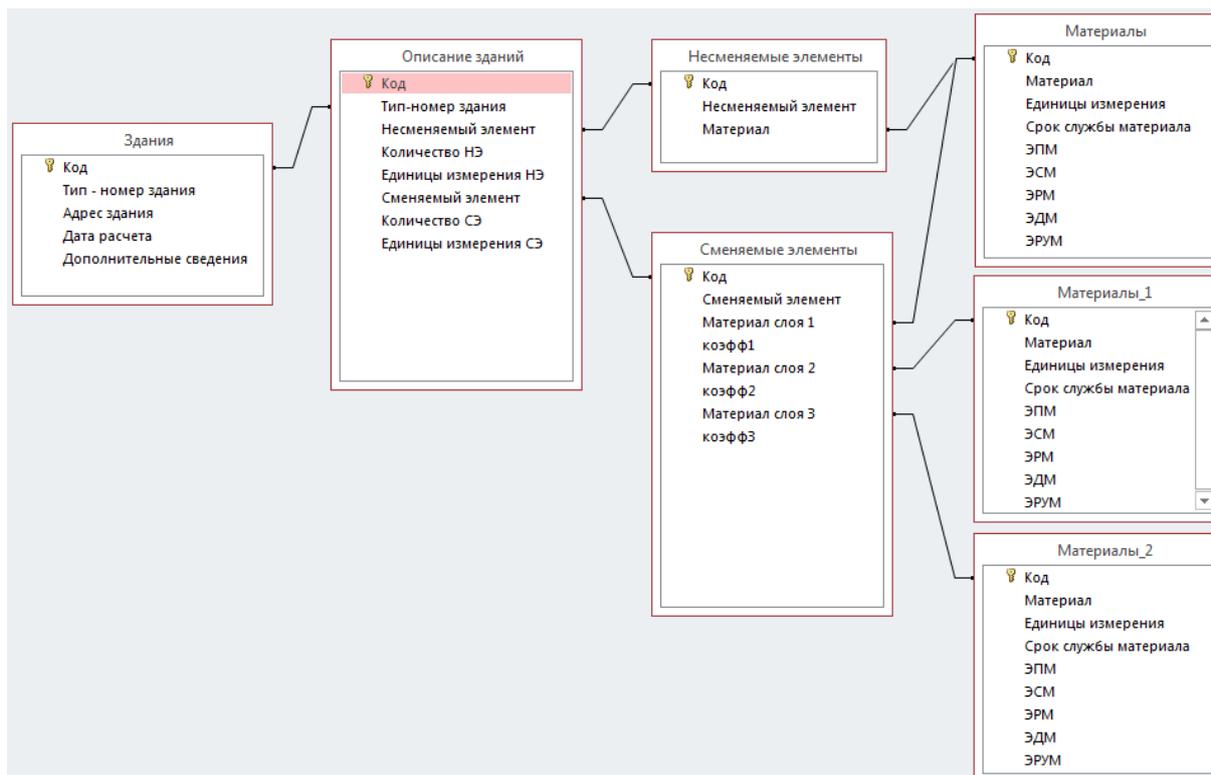
Отметим, что существующие в настоящее время методики определения энергоемкости зданий данный подход не учитывают.



**Рис. 1.** Участие строительных материалов, изделий и конструкций в течение жизненного цикла зданий

**Fig. 1.** The interference of building materials, products and structures in the building lifecycle

Опираясь на системный подход, авторами разработана структура базы данных энергоемкости строительных материалов, изделий и конструкций, в основе которой лежит реляционная модель (рис. 2).



**Рис. 2.** Принципиальная структура базы данных энергоемкости строительных материалов, изделий и конструкций для расчета энергоемкости жизненного цикла строительных объектов

**Fig. 2.** Principal structure of the energy intensity database of building materials, products and structures for calculating the energy intensity of the construction projects life cycle

Условные обозначения используемой базы данных:

НЭ – несменяемый элемент;

СЭ – сменяемый элемент;

ЭПМ – энергоемкость производства материала, изделия, конструкции, т.у.т.;

ЭСМ – энергоемкость строительства с использованием материала, изделия, конструкции, т.у.т.;

ССМ – срок службы до ремонта (замены) материала, изделия, конструкции, лет;

ЭРМ – энергоемкость ремонта (замены) материала, изделия, конструкции, т.у.т.;

ЭРКМ – энергоемкость реконструкции материала, изделия, конструкции, т.у.т.;

ЭДМ – энергоемкость демонтажа материала, изделия, конструкции, т.у.т.;

ЭРУМ – энергоемкость рециклинга материала, изделия, конструкции, т.у.т. [8].

Разделение элементов зданий на сменяемые и несменяемые является принципиальным, так как несменяемые элементы не подлежат замене; их срок жизни определяет срок жизни здания в целом. При проектировании им необходимо уделять особое внимание (рис. 3) и следует иметь в виду, что энергоемкость может не являться определяющим параметром выбора. При использовании же сменяемых элементов, если целевой функцией задана энергоемкость, предлагаемая база данных является основной информационной поддержкой.



Тип-ном	Несменяемый элемент	Единицы из	Количество	Срок службы	ЭнергоемкостьНЭ	ИтогоЭнергоемкостьНЭ
МКД-1	Фундамент сборный железобетонный	куб. м	503,35	150	0,26564	133,70888
МКД-1	Цоколь из керамического кирпича	куб. м	889,53	150	0,64878	577,10576
МКД-1	Ограждающие конструкции (силикатный кирпич)	куб. м	1045,28	150	0,26950	281,70507
МКД-1	Перекрытия железобетонные	куб. м	806,173	150	0,26564	214,15018
МКД-1	Внутренние стены (несущие)	куб. м	2549,62	150	0,26950	687,12772
МКД-1	Ограждающие конструкции (монолит бетон)	куб. м	35,9	150	0,28049	10,06959
МКД-1	Ограждающие конструкции (монолит каркас)	т	2,823	150	1,18506	3,34542
МКД-1	Внутренние стены (раствор)	куб. м	108,47	150	0,31414	34,07498
МКД-1	Ограждающие конструкции (раствор)	куб. м	720,3	150	0,31414	226,27650
МКД-1	Перемычки железобетонные	куб. м	92,94	150	0,26564	24,68840

**Рис. 3.** Отчет по энергоемкости несменяемых элементов

**Fig. 3.** Report on non-interchangeable elements energy intensity

В ходе расчетов к базе данных могут быть сформированы запросы по энергоемкости жизненного цикла в целом, по отдельным этапам, по несменяемым и сменяемым элементам. Пример отчета представлен на рис. 3.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Представленные в данной работе фрагменты базы данных сформированы в компьютерной программе Microsoft Access, реализуемой в отечественном программном продукте – СУБД (система управления базами данных). Также возможна реализация в виде плагинов, работающих по запросам к базам для 3D-моделирования зданий.

Наибольшей сложностью для создания полноценного информационного ресурса является ее наполнение данными энергоемкости строительных материалов, изделий и конструкций, учитывающих энергетические затраты на их производство, строительство, эксплуатацию, капитальные ремонты, рециклинг и утилизацию. Для этого необходимо провести работу на государственном уровне, чтобы обязать всех участников жизненного цикла строительных объектов постоянно обновлять базу данных, осуществлять их корректировку. Сервером для хранения данных могут являться ресурсы Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, другие государственные платформы. При этом данные должны быть представлены в машиночитаемом формате.

Авторами произведены расчет энергоемкости жизненного цикла многоквартирного жилого дома в г. Иваново с использованием электронных таблиц Excel и сведений, собранных из различных источников. Фрагменты расчетов представлены на рис. 4, 5.

Расчет произведен для десятиэтажного строения; материалы стен – силикатный и керамический кирпич, сборный железобетонный фундамент, утеплитель – пенополистирол с противопожарными рассечками из минераловатных плит.



Материал	Конструкция	Ед. изм.	Кол-во	Энергоресурсы на производство единицы измерения		Энергоресурсы на весь объём, т.у.т.
				в нат. выр.	в т.у.т.	
Железобетон	Железобетон (фундамент)	м <sup>3</sup>	503,35	80 + 54 + 74,24 = 208,24 кг у.т./м <sup>2</sup>		104,82
Кирпич	Кирпич силикатный утолщённый полнотелый СУР-150/15 ГОСТ 379-95	м <sup>3</sup>	1045,3	85 кг у.т. на тыс. шт. у.к.		221,02
Кирпич	Кирпич керамический 150/25 ниже отметки 0,000 + стены санузлов	м <sup>3</sup>	889,53	204,4 кг у.т. на тыс. шт. у.к.		452,29
Цементно-песчаный раствор	Раствор М 100 (кирпичная кладка, фасадная плитка)	м <sup>3</sup>	1080,5	240 кг у.т. на т цемента (произв.) + 7 кг у.т. на м <sup>3</sup> (приготовл.) марки М400		265,80

**Рис. 4.** Расходы энергоресурсов на производство строительных материалов и конструкций (фрагмент)

**Fig. 4.** Energy resources consumption for the production of building materials and structures (excerpt)

Наименование материала	Конструкция	Ед. изм.	Кол-во	Нормативный межремонтный срок службы, лет	Кол-во ремонтов за срок службы	Кол-во материалов для ремонта за срок жизни здания	Энергоресурсы на производство материалов для капремонта, т.у.т.
Металл	Металлические ограждения (лестницы)	т	1,72	15	9	15,51	29,46
Металл	Ограждение (кровля)	м <sup>2</sup>	36,94	15	9	332,42	8,17
Утеплитель	Пенополистирольные плиты ПСБС-25Ф по ГОСТ15588-85 толщиной 130 мм	м <sup>2</sup>	3266,0	50	2	6532,00	29,72
Гипсокартонные листы (ГКЛ)	ГКЛ 125 мм по системе KNAUF Серия 1.031.9-2.00	м <sup>2</sup>	1253,2	60	2	2506,49	28,07
Изоляционные материалы	Биокропласт ТПП ТУ 5774-019-17925162-2003 (кровля)	м <sup>2</sup>	738,70	10	14	10341,80	24,82

**Рис. 5.** Расходы энергетических ресурсов на производство строительных материалов для текущего и капитального ремонтов (фрагмент)

**Fig. 5.** Energy resources consumption for production of construction materials for current and capital renovation (excerpt)

Результаты расчета показали, что для осуществления жизненного цикла данного здания требуется 19.50 тыс. т.у.т. или 3.25 т.у.т. на 1 м<sup>2</sup> его площади. Очевидно, что такие энергозатраты являются весьма значительными, особенно в масштабах страны.



Поэтому предварительная оценка энергопотребления зданиями и другими строительными объектами в течение жизненного цикла является важной частью проектирования, которую возможно проводить с использованием предлагаемого информационного ресурса.

Предлагаемый информационный ресурс может быть использован при выборе строительных материалов, изделий и конструкций для проектирования тепловой защиты зданий и проведении многовариантных расчетов в случае, когда в качестве одного из критериев выбора выступает энергоэффективность [9]. Критерии энергоемкости жизненного цикла предлагаются к применению в рейтинговых системах оценки «зеленых» объектов, зданий с низким потреблением энергии, пассивных, «умных» и «комфортных» зданий [10].

## ВЫВОДЫ

Разработанный ресурс может стать одной из государственных информационных систем, в частности, элементом классификатора строительных материалов, а источниками данных могут служить производители строительных материалов, изделий и конструкций, а также строительные-монтажные организации, управляющие компании, застройщики и девелоперы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Савин В.К.** Строительная энергофизика. Энергоэкономика. М.: Лазурь, 2011. 418 с.
2. **Опарина Л.А.** Имитационное моделирование энергопотребления зданиями в течение жизненного цикла на основе аппарата стохастических агрегативных систем // *Жилищное строительство*. 2013. № 8. С. 22-24.
3. **Опарина Л.А.** Результаты расчета энергоемкости жизненного цикла зданий // *Жилищное строительство*. 2013. № 11. С. 50-52.
4. **Сулейманова Л.А.** Высококачественные энергосберегающие и конкурентоспособные строительные материалы, изделия и конструкции // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. Строительство и архитектура*. 2017. № 1. С. 9-16.
5. **Мизонов В.Е., Огурцов В.А.** и др. Процессы сепарации частиц в виброоживленном слое: моделирование, оптимизация, расчет. Иваново, 2010. 192 с.
6. **Баруздин А.А., Закревская Л.В.** Перспективы рециклинга в строительстве с целью создания инновационных композиционных материалов // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 3. С. 29-54. URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023)
7. **Савин В.К.** Строительная энергофизика. Энергосбережение. Образ и число. М.: Лазурь, 2018. 478 с.
8. **Опарина Л.А., Заянчуковская Н.В., Лыкова И.Н.** Создание реляционной базы данных энергоемкости строительных материалов // *Строительство и реконструкция*. 2013. № 6(50). С. 78-81.
9. **Ковригин А.Г., Блазнов А.Н.** Исследование эффективности практического применения теплотехнических характеристик изделий из стеклопластика в строительной отрасли // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 3. С. 18-28. URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023)
10. **Опарина Л.А.** Практическое применение методики расчета комфортности малоэтажной жилой застройки // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 1. С. 57-67. URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V4N1\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V4N1_2023)

Поступила в редакцию 13.10.2023

Одобрена после рецензирования 18.12.2023

Принята к опубликованию 21.12.2023



## REFERENCES

1. **Savin, V.K.** (2011) *Construction energy physics. Energy economics*. M.: Lazur (in Russian).
2. **Oparina, L.A.** (2013) Simulation modeling of energy consumption by buildings during the life cycle based on the apparatus of stochastic aggregative systems, *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, (8), pp. 22-24 (in Russian).
3. **Oparina, L.A.** (2013) Results of calculating the energy intensity of the life cycle of buildings, *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, (11), pp. 50-52 (in Russian).
4. **Suleymanova, L.A.** (2017) High-quality energy-saving and competitive building materials, products and structures, *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. Stroitel'stvo i arkhitektura*, (1), pp. 9-16 (in Russian).
5. **Mizonov, V.E., Ogurtsov, V.A. et al.** *Particle separation processes in a vibrating fluidized bed: modeling, optimization, calculation*. Ivanovo, 2010 (in Russian).
6. **Baruzdin, A.A. & Zakrevskaya, L.V.** (2023) Prospects of recycling in construction to produce innovative composite materials, *Smart Composite in Construction*, 4(3), pp. 29-54 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023) (in Russian).
7. **Savin, V.K.** (2018) *Construction energy physics. Energy saving. Image and number*. M.: Lazur (in Russian).
8. **Oparina, L.A., Zayanchukovskaya, N.V. & Lykova, I.N.** (2013) Creation of a relational database of energy intensity of building materials, *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*, 6(50), pp. 78-81.
9. **Kovrigin, A.G. & Blaznov, A.N.** (2023) Practical application efficiency of thermal performance of GFRP items in construction industry, *Smart Composite in Construction*, 4(3), pp. 18-28 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023) (in Russian).
10. **Oparina, L.A.** (2023) Practical application of the methodology for calculating the comfort of low-rise residential buildings, *Smart Composite in Construction*, 4(1), pp. 57-67 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V4N1\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V4N1_2023) (in Russian).

Received 13.10.2023

Approved after reviewing 18.12.2023

Accepted 21.12.2023



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 727.15

# Архитектурный опыт формирования групп помещений ресурсного назначения в школах обучения детей с расстройством аутистического спектра

**О.Н. Чеберева\*, Е.Ю. Стрельникова**

**Ольга Николаевна Чеберева, Елена Юрьевна Стрельникова**

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород,  
Российская Федерация

*chebereva@mail.ru\**; *lena.str.2011@yandex.ru*

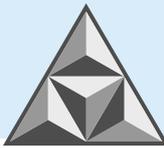


*В зарубежных школах более 40 лет проектируют помещения для организации инклюзивного образования лиц с расстройством аутистического спектра, имеющие основную цель – содействовать совместному обучению детей с заболеваниями различных нозологий. Формирование специальных групп помещений в общеобразовательной школе, где находятся учащиеся с такими расстройствами, позволяет организовать их обучение с минимизацией общественного негатива. При этом важным компонентом реализации является архитектурно-планировочная модель. В то же время в архитектурно-планировочных решениях образовательных организаций Российской Федерации в последние годы выявлены глобальные изменения, связанные с применением свободных универсальных планировок, наличием атриумных пространств и расположенных в них залов. Изучение зарубежного архитектурного опыта позволяет систематизировать данные и выдать рекомендации по объемно-планировочным решениям школ, которые в дальнейшем будут использованы в реалиях нашей страны.*

**Ключевые слова:** инклюзивная архитектура, инклюзия в школе, ресурсная зона, сенсорная комната, учащиеся с расстройством аутистического спектра (РАС)

**Для цитирования:**

Чеберева О.Н., Стрельникова Е.Ю. Архитектурный опыт формирования групп помещений ресурсного назначения в школах обучения детей с расстройством аутистического спектра // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 4. С. 61-74.  
URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4_2023)



SCIENTIFIC ARTICLE

# Architectural experience of creating groups of resource rooms in schools for children with autism spectrum disorder

**O.N. Chebereva\*, E.Yu. Strelnikova**

**Olga N. Chebereva\*, Elena Yu. Strelnikova**

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia

*chebereva@mail.ru; lena.str.2011@yandex.ru*



*Inclusive education facilities for persons with autism spectrum disorder have been designed in schools abroad for more than 40 years with the main goal of promoting joint education of children with different nosologies. Special groups of rooms in the general school where students with such disorders are located, allows to organize their education with minimization of social negativity. An important component for implementation is the architectural and planning model. At the same time, the architectural and planning solutions of educational organisations in the Russian Federation in recent years have revealed global changes associated with the use of free universal layouts, the presence of atrium spaces and halls located in them. The study of foreign architectural experience allows us to systematize the data and make recommendations on the volume-planning solutions of schools, which will be further used in the realities of our country.*

**Key words:** inclusive architecture, school inclusion, resource zone, sensory room, students with autism spectrum disorder (ASD)

**For citation:**

Chebereva, O.N. & Strelnikova, E.Yu. (2023) Architectural experience of creating groups of resource rooms in schools for children with autism spectrum disorder, *Smart Composite in Construction*, 4(4), pp. 61-74 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4_2023)



## ВВЕДЕНИЕ

Люди с расстройством аутистического спектра<sup>1</sup> (далее РАС) – особая категория граждан. Каждый индивидуум с РАС имеет неповторимое, только ему присущее сочетание основных признаков данного заболевания, поэтому в названии последнего присутствует слово «спектр». Уже во второй половине XX столетия в зарубежных странах началось обучение детей с РАС в условиях общеобразовательной школы. На сегодняшний день накоплен достаточно большой объем информации о методах организации пространств для реализации инклюзивного<sup>2</sup> обучения.

Целью данной работы является исследование возможностей формирования архитектурной среды школьных зданий, способствующей компенсации и социальной адаптации детей с РАС в условиях инклюзивных образовательных траекторий.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОЗЗРЕНИЯ И ОПЫТ ПРАКТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Магда Мостафа, специалист из Египта в области архитектурных решений и дизайна пространств для людей с РАС, с 2002 г. скрупулезно изучала вопросы инклюзивного обучения и создания специальных архитектурно-планировочных условий для поддержания качества педагогических технологий. Так, в статье «Architecrure for autism: Autism ASPECTSS™ in School Design» (2014) ею систематизированы, описаны и подтверждены основные требования к архитектурной среде образовательного учреждения [1]. По словам М. Мостафа, на период написания статьи не было никакого официального документа, описывающего конкретные требования к проектированию и учитывающего нужды и особенности людей с РАС. В Строительных бюллетенях (Building Bulletins) 77, 91, 94 приводится исчерпывающая информация по созданию комфортной среды для людей с различными ограничениями и возможностями, кроме аутизма. Ключом к организации правильной среды для людей с РАС является знание их реакции на сенсорные стимулы – свет, звук, цвет, качество воздуха, тактильность и др. М. Мостафа выдвигает гипотезу (которую подтверждает в своих дальнейших исследованиях), что архитектурное проектирование для лиц с РАС имеет два диаметральных подхода:

- «нейротипичный» – основывается на создании пространств, максимально тождественных любому подобному для нормотипичных пользователей;
- «сенсорный» (Sensory Design Theory), который автор определяет как наиболее эффективный, базирующийся на данных клинических исследований и на том, что изменение сенсорной среды может способствовать позитивному и конструктивному поведению людей с РАС, особенно в условиях обучения.

Пространства, выполненные с опорой на метод «сенсорного проектирования», имеют возможность «ступенчатого» варьирования под особенности конкретного человека и «растущие» потребности, усложняющиеся по мере развития и самоорганизации человека с аутичными чертами. М. Мостафа описывает связь аутичного поведения и архитектуры через

---

<sup>1</sup> Расстройство аутистического спектра – термин, используемый для описания группы расстройств развития центральной нервной системы (Как проявляются симптомы расстройств аутистического спектра (РАС) у детей раннего возраста: пособие для родителей, семьи и друзей. М.: Фонд «Выход», 2019. с. 7).

<sup>2</sup> Инклюзия – совместное пребывание нормотипичных людей и людей с ограниченными возможностями здоровья.



так называемую модель «сенсорного дизайна» и Индекс-дизайн ASPECTSS™ аутизма (Autism ASPECTSS™ Design Index). Последний является базовым для теории М. Мостафа и учитывает:

- акустические характеристики помещения (исходящие/входящие шумы, эхо, звукопоглощение и т.п.);
- логичность и последовательность пространства;
- наличие мест уединения;
- деление/структуризацию пространств на отдельные зоны посредством варьирования цвета, мебелировки, отделочных материалов и т.д.;
- организацию гармоничных переходов между помещениями (группами помещений, зонами) с различным уровнем стимуляции индивида – функций кабинетов, освещенности, акустических характеристик, количества присутствующих людей и т.п.;
- объединение помещений по уровню сенсорных стимуляций (близкий уровень шума/посещаемости/тактильности и т.д.);
- безопасность.

Теоретические аспекты статьи реализованы в образовательном проекте «Центр для детей с РАС» (Advance Education Center) в Каире (рис. 1). Центр включает школу и отдельное здание с квартирами для учащихся, в котором четко прослеживается деление на зоны стимуляции различного уровня: низкая (синий пунктир), высокая (красный пунктир), основная зона передвижения (зеленый пунктир), транзитные пространства (фиолетовый пунктир) [1].

После анализа предложений М. Мостафа сделан вывод, что архитектурно-планировочные решения школьных пространств для детей с РАС должны базироваться на естественных, жизненных формациях. Такое проектирование обеспечит необходимое качество обучения, даст возможность ученику мягко адаптироваться к социуму. При этом описываемые требования не являются абсолютно инновационными; они имеют связь со стандартным делением на функциональные блоки, разделением путей перемещения и дополняются рядом специфических компонентов (сенсорное зонирование, акустическая градация), которые придают помещениям предсказуемость и простоту восприятия.

Информацию о требованиях по организации школьного пространства для детей с РАС можно найти в зарубежных научных публикациях [1, 7-11] и нормах проектирования [2-5], которые обычно носят рекомендательный характер. В Великобритании подобные документы выпускаются с 1992 г. Актуальным является стандарт «Проектирование для детей-инвалидов и детей с особыми образовательными потребностями. Руководство для обычных и специальных школ» [2]. Основная цель – проектирование школьных зданий, в которых дети с ограниченными возможностями здоровья (ОВЗ) могли бы в полной мере участвовать в жизни школы, а также удобных для всех обучающихся (принцип универсальности пространства). Учитывая индивидуальные потребности каждого отклонения в развитии, требуется создавать подходящие объемно-планировочные решения. В соответствии с профилем данного исследования, рассмотрим конкретные рекомендации для лиц с РАС, приведенные в «Руководстве для обычных и специальных школ» [2]. Здесь подчеркивается, что такие лица испытывают трудности с восприятием окружения, общением и взаимодействием с другими людьми, поэтому для них требуется понятная, логично выстроенная зонированная среда с низким уровнем отвлекающих факторов и сенсорных стимулов для уменьшения тревожности или предотвращения дистресса, а также тихая комната в качестве места для уединения и успокоения.



- |   |   |
|---|---|
| 1. Главный вход.                                      | 1. The main entrance.                             |
| 2. Вход для администрации.                            | 2. Entrance for administrative staff.             |
| 3. Классы логопедического развития.                   | 3. Speech therapy developmental classes.          |
| 4. Вспомогательные помещения.                         | 4. Supporting facilities.                         |
| 5. Кабинеты администрации и преподавателей.           | 5. Offices of administration staff and lecturers. |
| 6. Бассейн и гидрореабилитация.                       | 6. Swimming pool and hydrorehabilitation.         |
| 7. Вход в жилой корпус.                               | 7. Entrance to the residential building.          |
| 8. Сенсорный сад.                                     | 8. A sensory garden.                              |
| 9. Игровая площадка.                                  | 9. Playground.                                    |
| 10. Площадки профессионального развития, садоводства. | 10. Professional development areas, gardening.    |

**Рис. 1.** План 1 этажа центра для детей с РАС (Advance Education Center) в Каире [1]

**Fig. 1.** Plan of the 1st floor of the Advance Education Center in Cairo for children with ASD [1]

Рекомендуемое количество учащихся в классе, в соответствии с английским «Руководством для обычных и специальных школ», варьируется в зависимости от выраженности и степени ограничений:

- 8-15 детей с умеренными поражениями;
- 6-8 детей с тяжелыми или глубокими поражениями;
- 4-6 детей с глубокими поражениями.

Также в данном издании подчеркивается важность создания благоприятной обстановки в образовательных учреждениях по следующим параметрам, которые помогают детям с различными поражениями, в том числе – с РАС:

- регулируемое освещение без бликов;
- качественные акустические решения;
- общий характер эстетики информационного и коммуникативного дизайна маршрутов движения в здании с использованием визуальных контрастов первичных формально-композиционных признаков и текстур для интуитивного определения маршрута с сенсорным подкреплением;



- нивелирование числа и уровня перцептивных стимулов, источников перевозбуждения.

В «Руководстве...» приводится описание сенсорной комнаты – неотъемлемого элемента организации школьного пространства, обязательного в случае реализации инклюзивных стратегий [2]. Предлагается предусматривать одно (площадью от 24 до 32 м<sup>2</sup>) или два таких помещения (от 12 до 16 м<sup>2</sup>) с высотой потолков не менее 2.8 м для обеспечения монтажа необходимого подвесного оборудования (рис. 2).

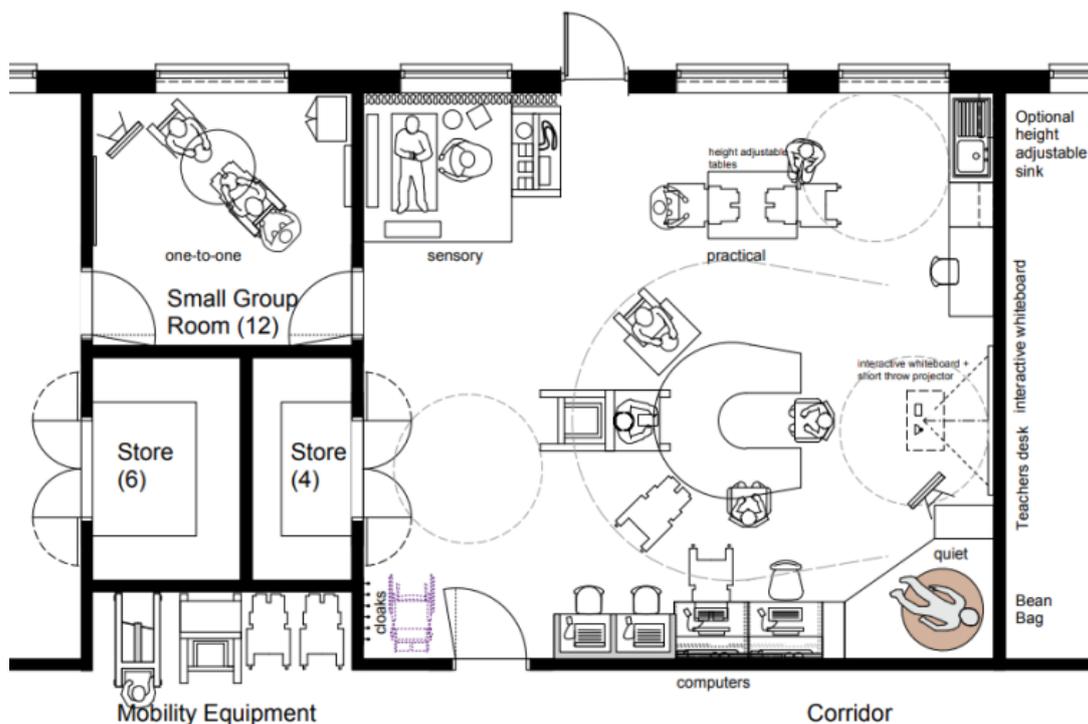


Рис. 2. План группы помещений для детей с различными видами ОВЗ [2]

Fig. 2. Plan of the rooms group for children with different types of disabilities [2]

Кроме того, рекомендуется организация мягких игровых комнат («soft play rooms») для обеспечения безопасной игровой активности и взаимодействия детей с тяжелыми поражениями, которые не способны в должной степени координировать свои движения [2]. Это могут быть пространства площадью приблизительно 24 м<sup>2</sup>, с отделкой мягкими панелями, для которых требуется использовать материал, устойчивый к моющим средствам и механическим воздействиям. Также регламентируется естественное освещение через оконные проемы с высокими отметками подоконников.

Востребованным и полезным решением является возможность трансформации классов: легкое и быстрое деление больших помещений на малые, и наоборот, в зависимости от решения конкретных педагогических задач в определенный момент времени.

Условия визуальной безопасности и просматриваемости также подчеркиваются в [2]. Принцип комплексного зонирования внутреннего пространства школьных зданий является одним из основополагающих для пребывания в них детей с РАС. Четкая и логичная группировка помещений (преподавание/обучение; терапия/медицинское обслуживание; столовая; социальная сфера; персонал/администрация и т.д.) позволяет детям создавать спокойные и доверительные отношения с непривычной пространственной средой, полной новых перцептивных стимулов.

В этом стандарте также рекомендуется организовывать замкнутые дворики, атриумы под открытым небом; при этом доступ в них из помещений является простым и логичным.



На территории для занятий детей с РАС следует организовать классы открытого типа площадью 55-65 м<sup>2</sup>, предусматривающие безопасность, просматриваемость и изолированность от внешних раздражителей [2]. В «Руководстве...» приведен план помещения для детей с разнообразными ОВЗ (см. рис. 2). Так, класс площадью 65 м<sup>2</sup> рассчитан на 6-8 учащихся, и в нем выделяются зоны групповой и индивидуальной работы, передвижной сенсорный уголок, тихая зона, рабочее место учителя, раковина регулируемой высоты. Смежно с классом проектируются изолированный кабинет индивидуального обучения (9-12 м<sup>2</sup>) и кладовая. Следует отметить, что специализация инклюзивных образовательных стратегий требует значительной материальной базы, использования материалов и оборудования, для хранения которых необходимо проектировать отдельные помещения во избежание нежелательного визуального «зашумления» классов.

Существует необходимость в организации классов практико-технологических занятий для 2-4 учащихся и 1-2 сопутствующих специалистов. Такие уроки могут проводиться в вышеупомянутом классе (что повлечет увеличение его площади и площади кладовых), а также прилегающих зонах общего пользования, специализированных помещениях или комнатах для занятий.

В Ирландии в 2021 г. опубликованы «Рекомендации по проектированию школ для лиц с особыми образовательными потребностями». Приводимые в издании рекомендации имеют связь как с особенностями восприятия детьми окружающей обстановки, так и с современными педагогическими программами. В частности, указывается, что учащиеся с РАС могут испытывать повышенный стресс и тревогу, войти в аффективную реакцию, мелтдаун (срыв от сенсорной перегрузки), неоднозначно воспринимая интерьер и экстерьер здания, уровень и частоту освещения. Особенностью структуры их психической реальности являются более высокие ожидания предсказуемости пространства. На этом основании внимание проектировщиков должно быть направлено на создание предсказуемой и упорядоченной школьной среды. Четкость планировки школьного здания и специально разработанные системы могут стать частью так называемого «инфодизайна» архитектурной среды и способствовать созданию комфортной обстановки для перемещения детей с РАС и другими ОВЗ [3]. На территории школы рекомендуется формировать изолированный сенсорный сад, доступный при поступлении запроса от учащегося. В климатических условиях Российской Федерации зоны такого типа (в том числе – озелененные) следует предусматривать внутри школьного здания, в пространствах атриумного типа, при этом функции сенсорных элементов выполняют детали отделки, мебели и оборудования.

В «Рекомендациях по проектированию школ для лиц с особыми образовательными потребностями» указывается, что большое значение для детей с РАС играет акустический комфорт помещений – различные системы снижения и регулировки внешних и внутренних шумов, т.к. ученики с РАС часто испытывают трудности с обработкой звука. Проблема заключается не только в естественных школьных шумах (от передвижения людей, разговоров, проведения занятий), но и возникает при звуковых колебаниях оборудования (например, от систем вентиляции воздуха) [3].

Одним из ключевых планировочных элементов для детей с РАС в образовательных учреждениях является ресурсная зона – отдельный учебный кабинет с незначительными модификациями, присутствующий во всех нормативных документах зарубежных стран [6-8]. В «Рекомендациях по проектированию школ...» Ирландии [3] указывается, что базовая классная комната, рассчитанная на 6 детей, должна иметь площадь 70-80 м<sup>2</sup> при высоте 3.15 м (рис. 3), располагаться на первом этаже и обеспечивать обучающимся непосредственный выход во двор для проведения уроков на свежем воздухе.

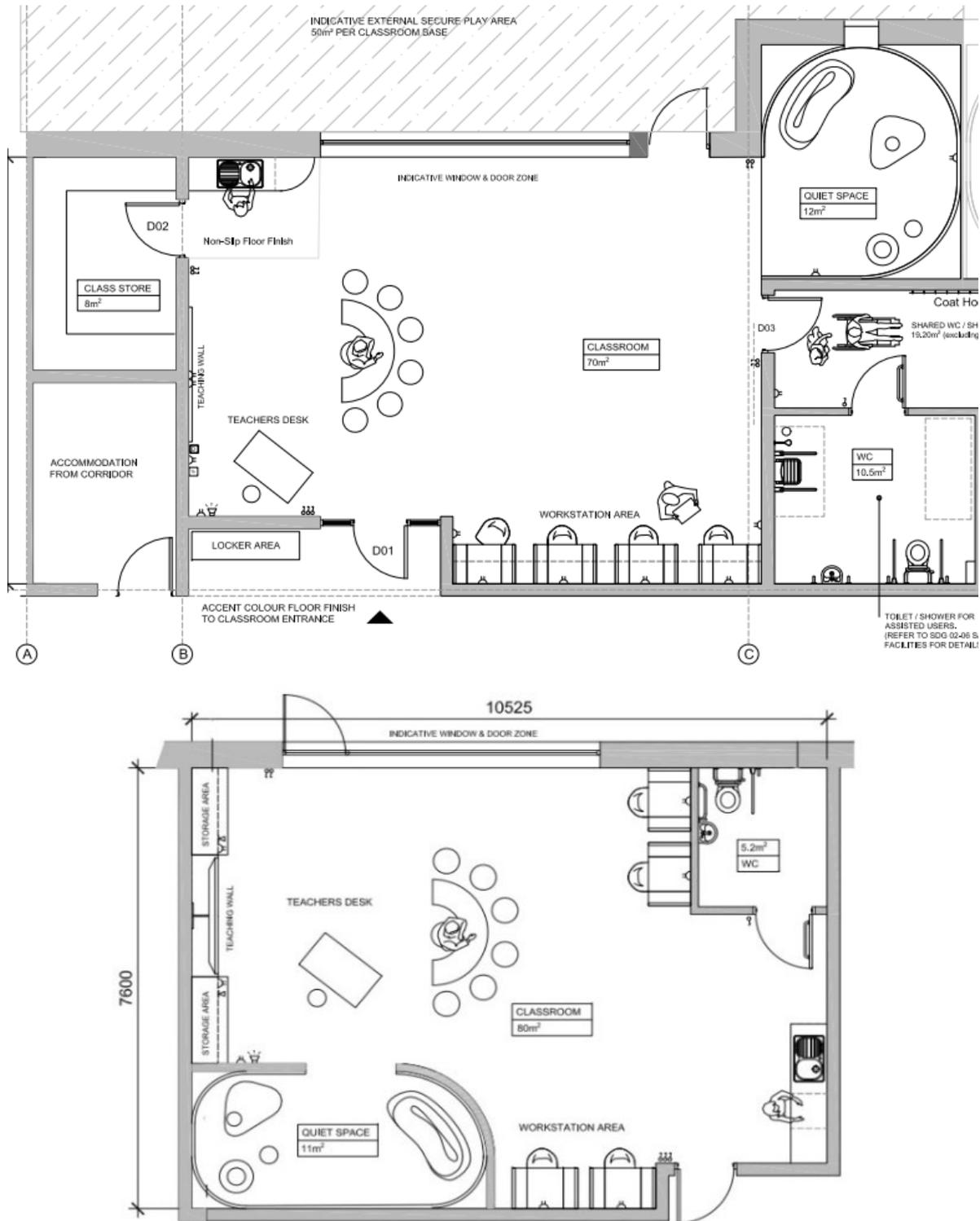


Рис. 3. Варианты организации основного учебного класса для детей с РАС [3]

Fig. 3. Organisation variants of the main classroom for children with ASD [3]

Внутри классной комнаты необходимо осуществлять четкое зонирование, о котором шла речь выше, посредством визуального и тактильного деления пространства и организации основных элементов, а именно:

- мест индивидуальной работы (ученик + учитель);
- мест групповой работы;
- места учителя.



Смежно с базовой классной комнатой в ирландских «Рекомендациях...» предлагают проектировать кабинет индивидуальных занятий с  $S = 8 \text{ м}^2$  (см. рис. 3). Также требуется организовать тихую комнату (quiet room) площадью 11-12  $\text{м}^2$  при высоте 3.15 м – как смежно (отдельное помещение), так и выделяя ее из общего пространства кабинета (см. рис. 3). В зависимости от конкретного учащегося и его состояния, решения тех или иных психолого-педагогических задач или купирования аффективных состояний эту комнату можно использовать для снятия высокого напряжения ребенка, снижения физической активности и/или релаксации. Ее можно проектировать без естественного освещения или с высоко расположенным небольшим окном и возможностью быстрого зашторивания [3].

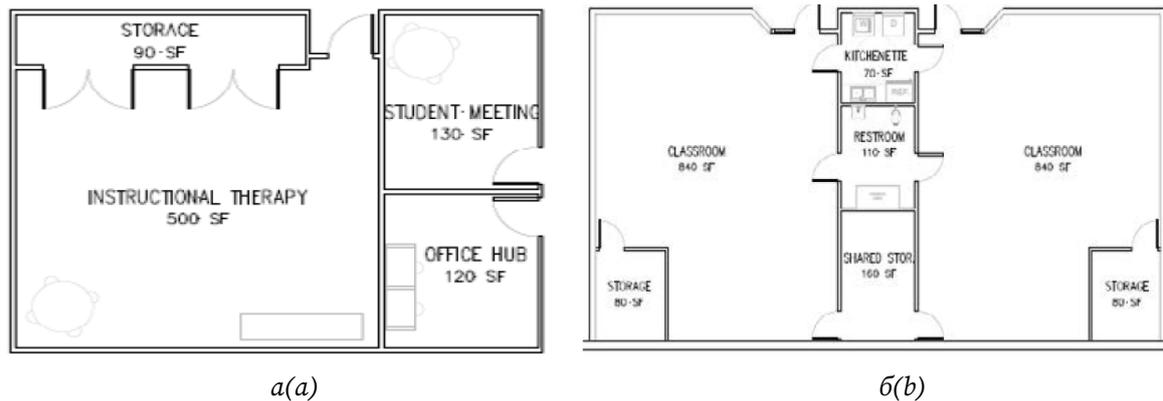
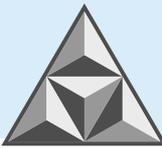
Для проведения дополнительного обучения необходима комната практических занятий (practical activity room) площадью порядка 50  $\text{м}^2$ . Она используется на занятиях по социально-бытовой ориентации, домоводству, деревообработке (тип подбирается по конкретному заданию на проектирование).

В 1988 г. в Бразилии было законодательно закреплено право людей с ОВЗ на гарантированное специализированное образование. В 2008 г. в документе «Национальная политика специального образования в перспективе инклюзивного образования» рекомендовано создание доступной архитектуры в рамках инклюзивного образования как для детей с ОВЗ и глубокими формами отсталости, так и, наоборот, для одаренных ребят. Бразильский исследователь М.Р. Родригес в работе «Краткая история инклюзивного образования: особенности специализированной образовательной помощи» отмечает, что большое значение для повышения эффективности обучения детей с отсталостью имело появление в бразильских школах, начиная с 2000-х гг. специализированных учебных кабинетов (specialized educational care rooms, ESA) [4].

В 2021 г. опубликованы «Рекомендации по проектированию школ» («School Design Guidelines»), где подробно описываются необходимые архитектурные решения при проектировании внутренних помещений, площадок (спортивных, для посадки и высадки учащихся), мест отдыха, организации кабинетов и др. [5]. Особый интерес представляют инструкции по проектированию помещений и классов для обучения лиц со специальными потребностями («Special Education Design Standards») [5]: схемы кабинетов и их площади, вспомогательные и дополнительные помещения, с указанием градаций по ступеням начальной, средней, старшей школы.

На рис. 4, а приведен пример функционального решения группы кабинетов для работы с умственно отсталыми детьми в начальных классах общей площадью 77  $\text{м}^2$ . Самым большим является учебно-терапевтическое пространство (46  $\text{м}^2$ ), смежно организована кладовая (8  $\text{м}^2$ ), рабочий кабинет педагога (11  $\text{м}^2$ , по 5.5  $\text{м}^2$  на учителя) и комната для детей в состоянии психологической перегрузки (12  $\text{м}^2$ ).

Аналогичная схема с увеличенными площадями (110/130  $\text{м}^2$  соответственно) рекомендуется для обучения детей средних и старших классов. Предлагаются решения для планировочной группы кабинетов инклюзивного обучения при условии интенсивного сопровождения учеников – с блокированием классов и включением вспомогательных планировочных модулей (мини-кухня, тихая комната, большое число кладовых), при этом – в непосредственной близости от санитарных узлов (рис. 4, б).



**Рис. 4.** Планы помещений для работы с умственно отсталыми детьми (начальная школа) (а) и обучения детей с глубокими формами отсталости (б) [5]

**Fig. 4.** Room plans for working with mentally disabled children (primary school) (a) and education of children with profound forms of disability (b) [5]

Таким образом, за четверть века активного развития инклюзии за пределами Российской Федерации накоплен определенный практический опыт строительства и эксплуатации зданий общеобразовательных школ, адаптированных для инклюзивных стратегий, а также опыт интеграции инклюзивных педагогических технологий и приемов формирования архитектурной среды образовательных пространств, планировочных, композиционных и инженерных решений [6-9]. Номенклатуру основных специализированных пространств в общем виде можно представить в виде типологического перечня:

- основной учебный кабинет для детей с ОВЗ, в том числе – с РАС;
- тихая комната;
- сенсорная комната;
- мягкая игровая комната;
- класс для практико-технологических занятий.

Анализ мирового опыта архитектурно-средовых решений [1, 4, 8-11], нормативной и рекомендательной литературы по проектированию школьных зданий, предназначенных для осуществления инклюзивных образовательных стратегий, а также растущее число учащихся с РАС и лиц с ОВЗ предопределяют необходимость его адаптации для использования в передовой отечественной практике.

## ВЫВОДЫ

Рождение ребенка с ОВЗ предугадать проблематично, при этом, согласно законодательству РФ (ст. 2, п. 27 ФЗ РФ № 273 от 29.12.2012 «Об образовании в Российской Федерации» (с изм. и доп.), вступ. в силу с 05.07.2023 г.), родители имеют право направить его для обучения в ближайшую общеобразовательную школу. В этой связи необходимо и целесообразно предложить каждой школе подготовить спектр объемно-планировочных решений, позволяющих проводить обучение таких детей.

Данная инклюзивная стратегия имеет глубокую социальную основу, суть которой сводится к максимальной адаптации в обществе и независимости существования для каждого человека с РАС, жизни вне интерната и, в перспективе, снятию с иждивения государства. По мнению авторов, инклюзивное (не домашнее) обучение – эффективная и «работающая» методика, способствующая реализации такой глобальной цели.



## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Mostafa M.** Architecture for autism: Autism ASPECTSS™ in School Design // *Int. J. Arch. Res. Archnet-IJAR*. 2014. Vol. 8, no. 1. P. 143-158. DOI:10.26687.
2. **Hawkins, G., Jenkins J.** Designing for disabled children and children with special educational needs Guidance for mainstream and special schools // *Building Bull.* 2008. No. 102. URL: [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/276698/Building\\_Bulletin\\_102\\_designing\\_for\\_disabled\\_children\\_and\\_children\\_with\\_SEN.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/276698/Building_Bulletin_102_designing_for_disabled_children_and_children_with_SEN.pdf)
3. *Planning and Design Guidelines Primary and Post Primary School Special Educational Needs Accommodation*. Tullamore: Planning & Building Unit Department of Education, 2021. 64 p.
4. **Rodrigues M.R.** A brief history of Inclusive Education: Characteristics of specialized educational care // *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*. 2020. No. 13. P. 164-174.
5. *School Design Guidelines* // *APS Facilities Design and Construction*. February 2021. URL: [https://www.aps.edu/facilities-design-and-construction/documents/design-standards-and-guidelines/HS\\_Standards.pdf](https://www.aps.edu/facilities-design-and-construction/documents/design-standards-and-guidelines/HS_Standards.pdf)
6. **Чечель И.Н.** Обзор заграничного опыта специальных образовательных учреждений для детей с аутизмом // *Наука молодых – будущее России: сб. науч. статей III Межд. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых (Курск, 11-12 декабря 2018 года)*. 2018. Т. 4. С. 304-310.
7. **Маркина К.Г.** Зарубежный опыт проектирования учебно-реабилитационных учреждений для детей-инвалидов // *Adv. Sci. Technol.: сб. статей XVIII Межд. науч.-практ. конф. (Москва, 31 января 2019 года)*. 2019. М.: Науч.-изд. центр «Актуальность РФ». С. 151-152.
8. **Sagun-Ongtangco K.S., Medallon K.G., Tan A.J.** Inclusive classrooms: making it work for peers of children with disability // *Int. J. Incl. Educ.* 2019. Vol. 25(4). P. 1-17. DOI 10.1080/13603116.2019.1568596.
9. **Пашкова М.Н., Скуднова Т.Д.** Инклюзивное образование в Испании: моногр. 2018. Москва-Берлин: Изд. "Директ-Медиа". 172 с.
10. **Кустовинова Е.С., Морозова О.В.** Принципы архитектурно-планировочной организации современных школ Финляндии // *Архитектон: известия вузов*. 2019. № 2(66). 3 с.
11. **Тучин Д.А., Власов Д.С., Белкина А.А.** Зарубежный опыт проектирования образовательной инфраструктуры // *Экономика и предпринимательство*. 2017. № 12-4(89). С. 250-253.

Поступила в редакцию 03.11.2023

Одобрена после рецензирования 05.12.2023

Принята к опубликованию 12.12.2023

## REFERENCES

1. **Mostafa, M.** (2014) Architecture for autism: Autism ASPECTSS™ in School Design, *Int. J. Arch. Res. Archnet-IJAR*, 8(1), pp. 143-158. DOI:10.26687.
2. **Hawkins, G. & Jenkins, J.** (2008) Designing for disabled children and children with special educational needs Guidance for mainstream and special schools, *Building Bull.*, (102) [online]. Available at: [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/276698/Building\\_Bulletin\\_102\\_designing\\_for\\_disabled\\_children\\_and\\_children\\_with\\_SEN.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/276698/Building_Bulletin_102_designing_for_disabled_children_and_children_with_SEN.pdf)
3. *Planning and Design Guidelines Primary and Post Primary School Special Educational Needs Accommodation*. (2021). Tullamore: Planning & Building Unit Department of Education.
4. **Rodrigues, M.R.** (2020) A brief history of Inclusive Education: Characteristics of specialized educational care, *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, (13), pp. 164-174.
5. *School Design Guidelines* (2021), *APS Facilities Design and Construction* [online]. Available at: [https://www.aps.edu/facilities-design-and-construction/documents/design-standards-and-guidelines/HS\\_Standards.pdf](https://www.aps.edu/facilities-design-and-construction/documents/design-standards-and-guidelines/HS_Standards.pdf)



6. **Chechel, I.N.** (2018) Review of foreign experience of special educational institutions for children with autism, *Nauka molodykh – budushcheye Rossii: sb. nauch. statey III Mezhd. nauch. konf. perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh. (Kursk. 11-12 dekabrya 2018 goda)*, (4), pp. 304-310 (in Russian).
7. **Markina, K.G.** (2019) Foreign experience in designing educational and rehabilitation institutions for disabled children, *Adv. Sci. Technol.: sb. statey XVIII Mezhd. nauch.-prakt.konf. (Moskva. 31 Yanvarya 2019 goda)*. M.: Nauchno-izdatelskiy tsentr «Aktualnost RF», pp. 151-152 (in Russian).
8. **Sagun-Ongtangco, K.S., Medallon, K.G. & Tan, A.J.** (2019) Inclusive classrooms: making it work for peers of children with disability, *Int. J. Incl. Educ.*, 25(4), pp. 1-17. DOI: 10.1080/13603116.2019.1568596.
9. **Pashkova, M.N. & Skudnova, T.D.** (2018) *Inclusive education in Spain: monograf.* Moskva-Berlin: Izd. "Direkt-Media" (in Russian).
10. **Kustovinova, E.S. & Morozova, O.V.** (2019) Principles of architectural and planning organization of modern schools in Finland, *Architecton: izv. vuzov*, 2(66), 3 p. (in Russian).
11. **Tuchin, D.A., Vlasov, D.S. & Belkina, A.A.** (2017) Foreign experience in designing educational infrastructure, *Ekonomika i predprinimatelstvo*, 12-4(89), pp. 250-253 (in Russian).

Received 03.11.2023

Approved after reviewing 05.12.2023

Accepted 12.12.2023



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72:712

# Семиотическое пространство ворот в архитектуре Дербента

**М.Н. Кюребекова**

**Мадина Нусратовна Кюребекова**

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

*kyurebekovamn@ystu.ru*



*Архитектура средневекового Дербента – монументальные памятники, сохранившиеся к третьему тысячелетию. Рассматривается семиотическое пространство каменных ворот Дербента. Они как элементы архитектуры являются неотъемлемой частью городской среды и передают историческую и культурную информацию, оказывают существенное влияние на формирование идей и смыслов. Определяются семиотические механизмы, порождающие смыслы и влияние на культуру и коммуникации. Эти механизмы оперируют понятиями языка и текста, а также выражаются посредством форм, символов, изображений. Дается описание городских ворот как архитектурных объектов через форму и определенные функции. Каждый аспект имеет особое значение, которое интерпретируется социумом и может использоваться для коммуникации. Архитектурное и социокультурное пространство ворот Дербента через обогащение новыми текстами и смыслами делает их ценными носителями культуры.*

**Ключевые слова:** архитектура Дербента, городские ворота, семиотика архитектуры, семиотическое пространство, семиотические механизмы

**Для цитирования:**

Кюрбекова М.Н. Семиотическое пространство ворот в архитектуре Дербента // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 4. С. 75-88.  
URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4_2023)



SCIENTIFIC ARTICLE

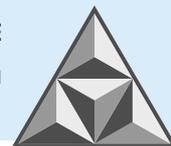
# Semiotic gate space in the architecture of Derbent

**M.N. Kyurebekova**

**Madina N. Kyurebekova**

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

*kyurebekovamn@ystu.ru*



*The architecture of medieval Derbent is composed of monuments preserved by the third millennium. The article considers the semiotic space of Derbent's stone gates. Gates as elements of architecture are an integral part of the urban environment and convey historical and cultural information, have a significant impact on the formation of ideas and meanings. The article defines semiotic mechanisms that generate meanings and influence on culture and communications. These mechanisms operate on the concepts of language and text, and are expressed through forms, symbols, and images. The author gives a description of city gates as architectural objects through form and certain functions. Each aspect has a special meaning interpreted by the society and can be used for communication. The architectural and socio-cultural space of Derbent gates is enriched with new texts and meanings making them valuable cultural media.*

**Keywords:** Derbent architecture, city gates, semiotics of architecture, semiotic space, semiotic mechanisms

**For citation:**

Kyurebekova, M.N. (2023) Semiotic gate space in the architecture of Derbent, *Smart Composite in Construction*, 4(4), pp. 75-88 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4_2023)



## ВВЕДЕНИЕ

Архитектурное пространство Дербента характеризуется уникальным сочетанием исторических и культурных объектов. Одним из выдающихся архитектурных объектов – достопримечательностью города являются каменные ворота Дербента. В исследование архитектуры ворот значительный вклад внес С.О. Хан-Магомедов, член Российской академии архитектуры и строительных наук. Кроме того, особую ценность представляют археологические данные, полученные А.А. Кудрявцевым. Ворота несут высокую символическую и информационную нагрузку, способствуют определенному восприятию и интерпретации пространства. В связи с этим предметом настоящего исследования является семиотическое пространство ворот Дербента, одного из самых южных городов России.

Семиотическое пространство архитектуры – концепция, в основе которой лежит идея, что архитектура имеет семиотическую природу и может быть рассмотрена как язык, в котором знаки и символы используются для передачи определенных значений и сообщений. Семиотика – это наука, изучающая системы и процессы образования, восприятия и интерпретации знаков; знаки – основные элементы семиотических систем, передающие смысл и информацию.

Понятие «семиосфера», предложенное Ю.М. Лотманом [1], связывается с семиотическим пространством, которое является важнейшим условием для осуществления коммуникации, существования и функционирования языков. В этом контексте язык рассматривается как часть семиотического пространства. Семиотическое пространство независимо от языка коммуникации, предполагает диалог между поколениями.

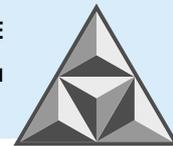
Город за всю историю своего существования образует семиотическую структуру. В свою очередь, культура города предлагает семиотическую модель как сложную многоуровневую систему. Проблема создания интегративного целостного образа города, осмысление структуры и принципов формирования его архитектурного пространства раскрываются с опорой на семиотический метод [2].

Архитектура ворот Дербента, обладая масштабностью, является мощным инструментом хранения информации о социокультурном пространстве города. «В средневековых городах ворота, помимо оборонительных задач, выполняли разнообразные социальные функции. В первую очередь, это были форпосты городской торговли, поскольку внутри или около них располагались торговые ряды, пункты сбора налогов и обмена денег. Здесь же происходили судебные разбирательства, оглашались административные указы, нанимались на работу поденщики и ремесленники, территория вблизи ворота была «самым людным местом города», где приезжие впервые сталкивались с местным населением, узнавая новости, цены и метрические стандарты, принятые в данном городе. Некоторые городские ворота были открыты круглосуточно, другие закрывались на ночь, что отразилось в топонимике городов в разных странах – Дарбанд, или Дербент, т.е. «ворота заперты» [3].

В настоящей работе поставлена цель выявить семиотические механизмы, определяющие смысловую нагрузку в архитектуре ворот Дербента, построенных еще в средние века.

## ГОРОДСКИЕ ВОРОТА КАК СЕМИОТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

В архитектуре существует широкий пласт устойчивых ценностей, связанных с ориентацией, идентификацией человека в среде и дающих базовые представления об обитаемом пространстве. Все эти ценности не только несут информацию, но и через



семиотическую систему архитектурного объекта транслируют важность строения, значимость события и др. Семиотическая система – механизмы коммуникации, с помощью которых люди сохраняют, используют и передают информацию, полученную в архитектурной среде. Ценности, переданные через семиотические системы, связываются с механизмами смыслопорождения в архитектуре. «Семиотические механизмы в архитектуре работают двояко – через форму, организующую пространство, и через событие, возможное в организованном пространстве» [4]. В свою очередь, события способствуют поиску и нахождению смысла в происходящем и помогают людям взаимодействовать, обмениваться информацией в социальных и культурных контекстах. Общая семиотическая система, которая существует в рамках определенной группы или сообщества, формирует социокультурное пространство.

Дербентские ворота служили входами и выходами из города и одновременно являлись защитными сооружениями. Они были укреплены и имели защитные элементы. Например, башни служили точкой обороны в случае нападения или осады. Ворота же как объекты архитектуры представляют собой сложные семиотические системы, которые можно рассматривать в виде «городских текстов». Архитектурный объект горожанин воспринимает и оценивает в целостности: соразмерность, единство формы, гармоничность городского пространства [5].

Семантика камня соотносится с архитектурной идеей городского пространства. Прямоугольный принцип отражает структуру городской среды, а твердость камня связана со смыслом вечности города. Прямоугольный камень задает городу «созидательный ритм», противодействуя разрушению [6]. В воротах Дербента прямоугольный принцип транслирует мастерство кладки камня. Следует отметить развитый характер художественной камнеобработки средневекового ремесленника и уровень декоративно-прикладного искусства, что отражается в семантике камня.

Высеченный на камне текст представляет собой своеобразный символ, оставленный на поверхности с помощью инструмента – резца или долота. Такой текст может иметь различные значения и содержать информацию о персоне, исторических событиях, а также служить для обозначения границ территории или важных объектов.

Система знаков, текстов – это «летопись» города, где форма в архитектурно-пространственной среде находит свое логическое выражение. Семиотические механизмы обеспечивают передачу ценностей, норм, традиций и идентичности. Таким образом, городские ворота Дербента ассоциируются с различными семиотическими механизмами (архитектурная форма, функции, знаки и символы, тексты и смыслы).

## АРХИТЕКТУРНАЯ ФОРМА И ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ГОРОДСКИХ ВОРОТ

Ворота сами по себе связаны с семиотическими механизмами, поскольку не только выполняют функцию физической преграды, но и имеют семиотическую природу и символическую значимость. Городские ворота (в переводе с тюрк. – капы) представляли важное значение для Дербента. Сам город носил название Баб аль-Абваб (в пер. с араб. – Ворота ворот, главные ворота), Темир-капы (в пер. с тюрк. – Железные ворота), Дарбанд (в пер. с перс. – Узел ворот) и др. С момента возведения северной и южной стен и по сегодняшний день в XXI столетии ворота Дербента служили и служат символами города.

Северная и южная городские стены тянутся от цитадели «Нарын-кала» параллельно, их протяженность – 3 км. Расстояние между стенами составляет около 350 м, и оно увеличивается по мере приближения к приморской части города. Северная стена играла



основную роль в обороне. Она выглядит более представительно (от 2.8 до 4.0 м), построена на прочном углубленном фундаменте и укреплена мощными полукруглыми, прямоугольными и трапециевидными полыми башнями, а южная стена – только прямоугольными башнями [6, 7]. В северную и южную стены были встроены ворота, которые также являлись частью фортификационной городской системы.

Число ворот менялось в зависимости от политических событий, нужд города и необходимости вести оборону; поэтому авторы, писавшие о Дербенте, приводят различные данные. Препятствие установить облик ворот сложно, многие значимые элементы утрачены навсегда. Стратегическое расположение Дербента способствовало развитию торговли, это был единственный проход между горами и морем. Караваны, следующие через Дербент, проходили ворота как с северной стороны, так и со стороны южной стены. Таким образом, ворота Дербента символизировали границу или переход из одного пространства в другое.

На сегодняшний день трое ворот – Джарчи-капы, Кырхляр-капы, Даш-капы – обеспечивают вход в город с северной городской стены. Первые ворота, примыкающие к цитадели Нарын-кала, называют Джарчи-капы, что в переводе обозначает «Ворота вестника». Именно через эти ворота отдавались распоряжения правителей города (рис. 1).

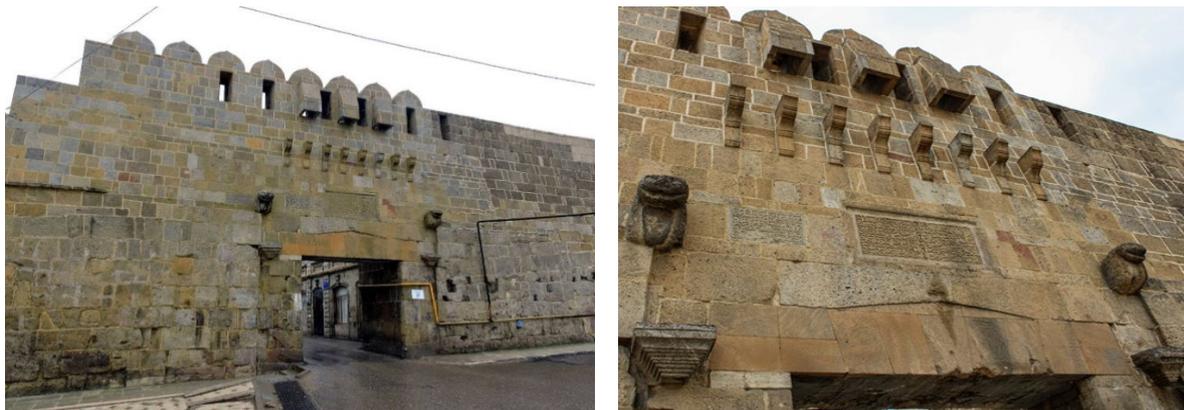
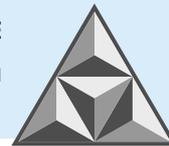


**Рис. 1.** Северная стена. Джарчи-капы

**Fig. 1.** The Northern Wall. Jarchi-kapa

Русские защитники крепости называли их «Водяными воротами», так как они вели к родникам. Ворота украшены цельным стрельчатым фигурным камнем [8].

Вторые ворота северной городской стены – Кырхляр-капы (в пер. с тюрк. – «Ворота сорока») имеют одноименное название с кладбищем Кырхляр, где покоятся тела сорока воинов (рис. 2).

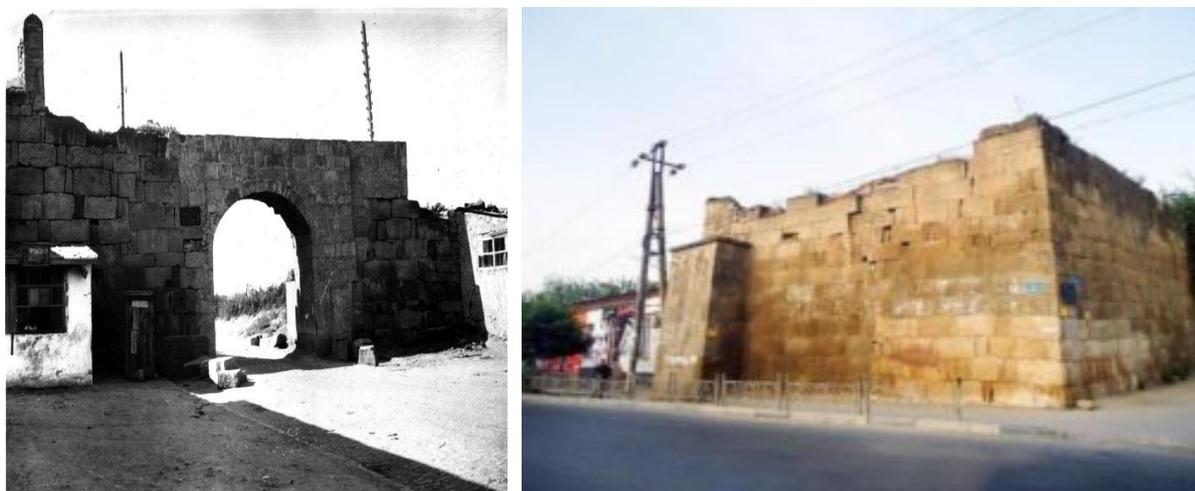


**Рис. 2.** Северная стена. Кырхляр-капы  
**Fig. 2.** The Northern Wall. Kyrkhlyar-kapa

Арабы называли их Бабаль-Кабир («Большие ворота»), а также Бабаль-Джихад («Ворота священной войны»). Русские авторы называли эти ворота Кизлярскими, так как они вели в сторону русской крепости Кизляр.

В северной стене Дербента находились также главные парадные ворота, построенные в VI в. и отождествляемые в наши дни с различными архитектурными пластами времени. Проем Кырхляр-капы (ширина 3.4 м) перекрыт плоской клинчатой перемычкой из семи камней высотой до 90 см. В кладке XIV-XV столетий сохранились восемь каменных кронштейнов сложного профиля. Композицию венчают стрельчатые зубцы с тремя машикулями.

Ворота Даш-капы (IX в.) названы Каменными, поскольку они вели к каменоломням (рис. 3).

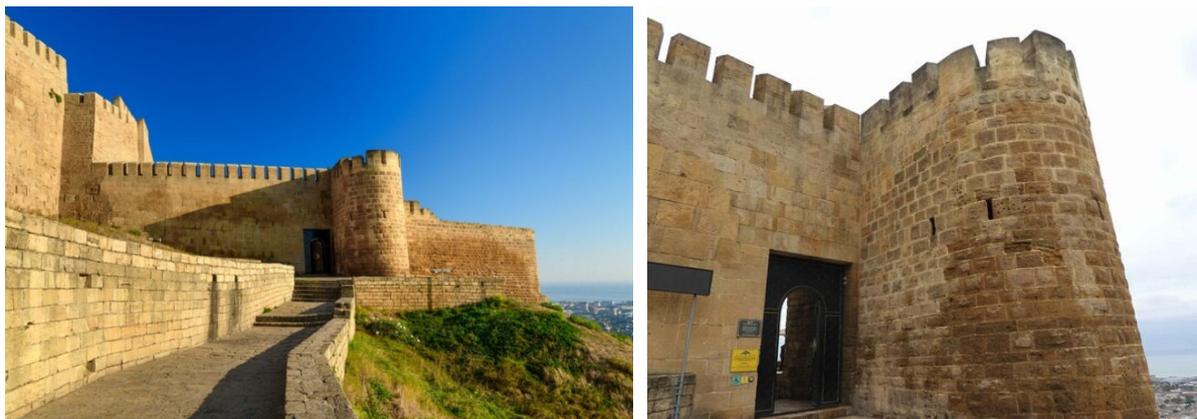


**Рис. 3.** Северная стена. Даш-капы  
**Fig. 3.** The Northern Wall. Dash-Kapa

Каменные ворота, вследствие небольших размеров, арабские авторы IX-X в. также именовали «Малые ворота». Их русское название – Шуринские, так как через эти ворота шла почтовая дорога к городу Темир-Хан-Шура (ныне – город Буйнакск). Нижняя часть ворот по размерам, кладке и форме совпадает с Кырхляр-капы. Позднее ворота Даш-капы были разобраны, и сейчас на их месте проходит транзитная магистраль [9].

Четверо ворот южной городской стены – Кала-капы, Баят-капы, Орта-капы, Дубары-капы – строились с V до XVIII столетия.

Первые ворота южной стены, Кала-капы (XVI-XVIII в.) – ворота, ведущие в крепость (рис. 4); в переводе с тюрк. – «Ворота крепости, цитадели».



**Рис. 4.** Южная городская стена. Кала-капы

**Fig. 4.** The Southern City Wall. Kala-kapa

В 1920 г. эти ворота обрушились, и на их месте в стене в течение четырех десятилетий существовал проем; в 1960 г. произошло восстановление ворот. Внешний фасад Кала-капы предельно прост – прямоугольной формы, с клинчатой перемычкой в крепостной стене. Внутренний фасад имеет сводчатое перекрытие прохода стрельчатой формы [9].

Вторым воротам южной городской стены – Баят-капы (V в.) арабы дали название Баб эль-Мактуб («Ворота писем» или «Почтовые ворота») (рис. 5).

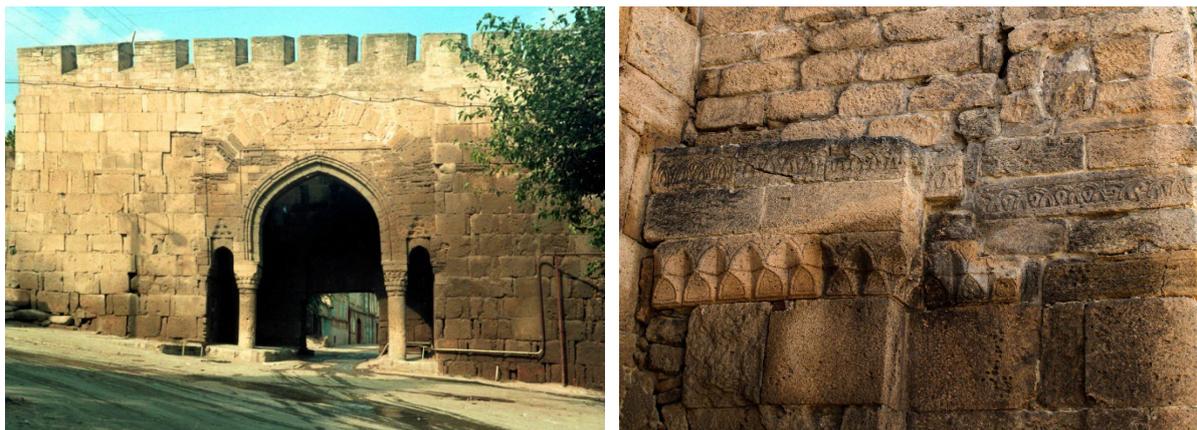


**Рис. 5.** Южная городская стена. Вторые ворота Баят-капы

**Fig. 5.** The Southern City Wall. The second gate of the Bayat-kapa

Баят-капы имеют два арочных проема, между которыми есть проход, перекрытый сводом. Однотипные обрамления обоих арочных проемов (пролеты 3.36 м) выложены из тесаных камней и состоят из полуциркульных архивольтов (с выраженным замковым камнем) и пилястр с капителями в виде выкружки с полочкой. Общая композиция ворот создает образ сдержанного по форме, однако по сути – парадного входа в город [10].

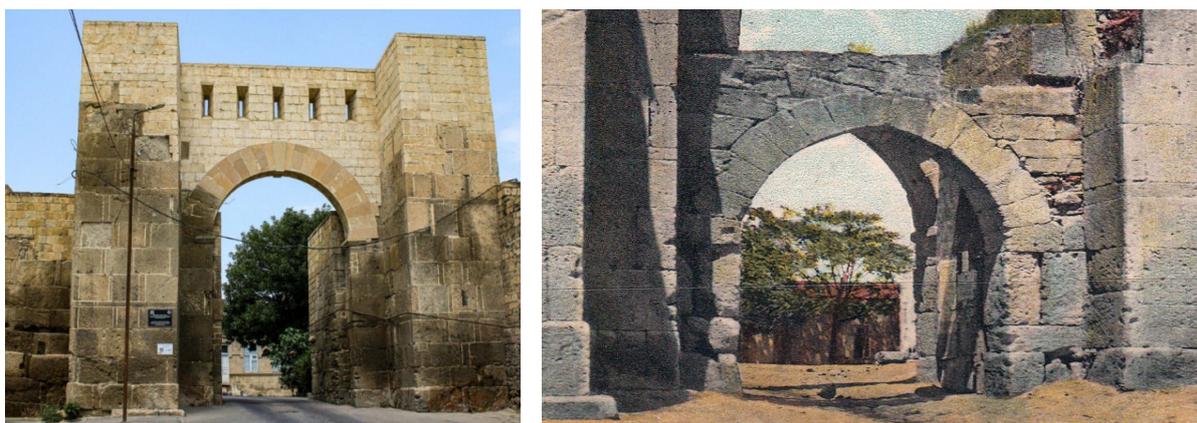
Третьи ворота южной городской стены – Орта-капы («Средние ворота») считаются самыми красивыми; их многовековое декоративное наполнение вызывает большой интерес. Орта-капы относятся к числу древнейших (рис. 6) и рассматриваются как южные парадные ворота города.



**Рис. 6.** Южная городская стена. Орта-капы  
**Fig. 6.** The Southern City Wall. Orta-Kapa

Ворота фланкированы прямоугольными глухими башенными выступами, между которыми сооружена декоративная стенка, прорезанная одной большой и двумя маленькими стрельчатыми арками, опирающимися на круглые колонны со сталактитовыми капителями [10].

Строительство четвертых ворот – Дубары-капы (рис. 7) относится к X–XI столетиям. Со второй половины VIII в. город стал крупнейшим портом на Каспийское море, центром морской торговли.



**Рис. 7.** Южная городская стены. Дубары-капы  
**Fig. 7.** The Southern City Wall. Dubary-kapa

Несмотря на сходство архитектурной формы и способа кладки с Орта-капы, эти ворота представляют собой более позднюю конструкцию. Если на фотографиях 1914 года ворота еще имели стрельчатую форму (сходство с перекрытием Орта-капы), то в 2000-х годах после реставрационных работ перекрытие ворот приняло вид полуциркуля.

Городские ворота неоднократно перестраивались, и это стилистически отразилось в архитектурных приемах. У сохранившихся ворот можно обнаружить слои каменной кладки, относящиеся к различным периодам развития Дербентской архитектуры. Целенаправленно создавался образ городских ворот с определенными мировоззренческими установками, символами и знаками. В течение многих веков изменялись жители и культурные традиции, осваивались языки, обустривалась жизнь, производились реставрационные работы. Со временем городские ворота потеряли военную и политическую значимость и стали, прежде всего, символами архитектуры, истории и культуры.



## СЕМИОТИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ: ЗНАКИ, СИМВОЛЫ, ТЕКСТЫ, СМЫСЛЫ

В большинстве древних построек Дербента архитектурно-декоративные элементы применялись скупно [9, 10]. Следует отметить, что декор каменных ворот являлся важным элементом архитектурного стиля и отражал идеалы общества, религиозные традиции, мировоззренческие установки. Арабский автор Ибн-аль-Факих (X в.) писал о Кырхляр-капы: «...на стене над воротами имеются две колонны, на каждой из которых – изображение льва из белого камня. А ниже расположены два камня с изображением львиц. Близ ворот – изображение человека из камня; около его ног – статуя лисицы, а в ее пасти – кисть винограда» [11].

На Кырхляр-капы и сегодня можно увидеть скульптурный фрагмент двух львов высотой 70 см. Львы на каменных воротах, представленные парой самец-самка, символизировали силу, мощь, защиту, власть династий и правителей, ассоциировались с мудростью, долголетием и благосостоянием. Статуя лисицы также имеет символическое значение в исламской культуре. Лисица в сказках и притчах является символом выживания в трудных условиях и поиска пути к достижению цели. Кисть винограда – знак, символизирующий развитый промысел виноградарства в Дербенте. Таким образом, ворота с внешней северной стороны транслировали информацию о силе, величии и развитии города. Высеченные на камне тексты использовались для передачи сообщений будущим поколениям, а также, на примере Баят-капы, формировали диалог культур. Поверх старой арабской надписи над проемом этих ворот была выбита русская надпись: «Время меня разрушило, а послушание меня построило. 1811 год» (рис. 8).

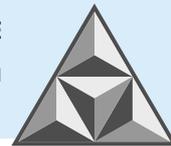


**Рис. 8.** Надпись на воротах. Баят-капы  
**Fig. 8.** The script on the gate. Bayat-kapa

Таким образом, высеченный на камне текст, с одной стороны, несет потомкам определенную информацию, а с другой стороны – имеет символическое значение.

Семиотические механизмы сильно влияют на межкультурное взаимодействие. Они определяют способы коммуникации и восприятия других культур. Каждая культура использует свои уникальные механизмы, используемые через символы, образы и посредством языка для выражения и передачи информации.

Надписи на воротах произведены профессиональным резчиком-каллиграфом (араб. – хаттат) по камню преимущественно на арабском языке, почерк нанесения – насх или куфи.



Самая ранняя датированная надпись, сопровождаемая вводным текстом, относится к 1044 г. Камень с этой надписью, вставленный в арку Орта-капы, зафиксировал формулу единобожия ислама. Куфическая надпись на двух плитах включает три части, при этом текст расположен в центре и нанесен посредством выемки фона [12]. Как известно, язык помогает людям идентифицировать себя и других, определить принадлежность к определенной группе или сообществу.

Сохранившаяся арабская надпись, помещенная над Кырхляр-капы, гласит, что ворота отреставрированы во времена шаха Халила и использованы для охраны города от посягательств «неверных». Также она свидетельствует о том, как во времена Александра Македонского удалось уберечь город от чудовищного Яджуджа (легенда о строительстве стены Александром Македонским против народа Яджуджа; тюрки-степняки) (рис. 9); относится к XV в.



**Рис. 9.** Надпись на воротах. Кырхляр-капы

**Fig. 9.** The script on the gate. Kyrkhlyar-kapa

Из этого следует, что текст в данном случае несет информацию о персоне, исторических событиях и даже может отразить легенду.

Важную роль в процессе создания и распространения культурных продуктов играют семиотические механизмы, помогая передать и интерпретировать идеи, ценности и нормы. Культурные тексты (литература, устное народное творчество) используют семиотические механизмы для коммуникации с аудиторией и влияния на ее восприятие и опыт.

Ворота Дербента не раз становились «носителями» легенд. Так, Джарчи-капы («Ворота вестника») арабы также называли Баб аль-Мухаджир («Ворота беглецов»). Второе название появилось благодаря легендарной истории, когда хазары, владевшие городом, не выдержав длительной осады арабов под предводительством Масламы (716 г.), поспешно его покинули, выбрав для побега ворота Джарчи-капы. Так появились и новое название ворот, и связанная с ней легенда. Легенды, передаваемые из поколения в поколение, формировали у горожан символический образ города, в котором борьба за власть шла веками.

Семиотическое пространство ворот Дербента открывает возможности для интерпретации и понимания архитектуры с помощью визуальных, символических и эмоциональных



аспектов. Это позволяет памятникам создавать определенные интенции и воздействовать на чувства и восприятие людей.

Городские ворота впечатляли всех, кто посещал город; путешественники неизменно ими восхищались. Так, Александр Дюма-отец, путешествуя по Кавказу и затем посетив Дербент, оставил множество заметок, одну из которых посвятил Орта-капы: «Перед нами лишь массивные ворота, принадлежащие, судя по контурам, к восточной могущественной архитектуре, предназначенной презирать века» [13].

Семиотические механизмы городских ворот также формировали и утверждали социальные роли и статусы. Например, Дубары-капы появились по мере представления города в роли крупного торгового центра и центра морской торговли.

Таким образом, ворота Дербента, исходя из контекста и культурных значений, воплощают в себе множество смыслов. Их семиотическая природа позволяет им не только выполнять конкретные функции, но и служить источником символического значения.

## ВЫВОДЫ

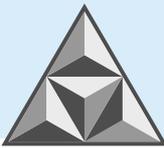
Архитектура городских ворот Дербента, несмотря на различное время выполнения строительных работ, кладку, реконструкцию, реставрацию, имеет общие характерные черты:

- для постройки ворот использован местный природный камень;
- ворота украшены скульптурными элементами;
- на воротах имеются исторические и религиозные надписи;
- используются уникальные семиотические механизмы для выражения и передачи информации (через воздействие языка, символов и образов).

Архитектурное пространство ворот Дербента, оказывая мощное влияние на коммуникацию и взаимодействие людей, способствует созданию новых социальных структур и формированию культурных ценностей в жизни горожан.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Лотман Ю.М.** Семиосфера. СПб.: Искусство-СПБ, 2000. 704 с.
2. **Берестовская Д.С., Петренко А.П.** Архитектурное пространство города: семиотический подход // *Урбанистика*. 2017. № 1. С. 24-34.
3. **Суворова А.А.** Городские ворота Лахора: к феноменологии города // *Вестник Москов. ун-та. Сер. 13. Востоковедение*. 2008. № 2. С. 85-97.
4. **Янковская Ю.С.** Семиотические механизмы архитектуры // *Изв. Урал. гос. ун-та*. 2004. № 32. С. 81-88.
5. **Кюребекова М.Н.** Архитектурная среда как смыслообразующий концепт города (на примере средневекового и современного Дербента) // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 1. С. 81-90. URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V4N1\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V4N1_2023)
6. **Гасанова М.Н.** Взаимодействие религиозного и светского в духовной культуре г. Дербента: дис. ... канд. филос. наук. Махачкала, 2006.
7. **Кудрявцев А.А.** Мусульманский город Дагестана. Махачкала: Дагестан. кн. изд-во, 1994. С. 222.
8. **Кудрявцев А.А.** Феодалный Дербент: пути и закономерности развития города в VI – середине XIII вв. М.: Наука, 1993. 320 с.
9. **Хан-Магомедов С.О.** Дербент. Горная Стена. Аулы Табасарана. М.: Искусство, 1979. 288 с.
10. **Хан-Магомедов С.О.** Архитектура Дагестана: Дербентская крепость и Даг-Бары. Вып. 5. М.: Ладья, 2002. 421 с.
11. **Ибн-Аль-Факихал-Хамадани.** Книга стран / пер. Н.А. Караулова. Тифлис: Тип. канц. главнонач. гражд. ч. на Кавказе, 1902. 57 с.
12. **Шихсаидов А.Р.** Эпиграфические памятники Дагестана X-XVII вв. М.: Наука, 1984. С. 317-318.
13. **Дюма А.** Кавказ. Тбилиси: Изд-во «Мерани», 1988. 648 с.



Поступила в редакцию 30.10.2023

Одобрена после рецензирования 12.12.2023

Принята к опубликованию 18.12.2023

#### REFERENCES

1. **Lotman, Yu.M.** (2000) *Semiosphere*. SPb: Iskusstvo-SPB (in Russian).
2. **Berestovskaya, D.S. & Petrenko, A.P.** (2017) Architectural space of the city: a semiotic approach, *Urbanistika*, (1), pp. 24-34 (in Russian).
3. **Suvorov, A.A.** (2008) City Gate of Lahore: to the phenomenology of the city, *Vestnik Moskov. un-ta, Ser. 13. Vostokovedenie*, (2), pp. 85-97 (in Russian).
4. **Yankovskaya, Y.S.** (2004) Semiotic mechanisms of architecture, *Izv. Ural. Gos. Un-ta*, (32), pp. 81-88 (in Russian).
5. **Kurebekova, M.N.** (2023) The architectural environment as a semantic concept of the city (using the example of medieval and modern Derbent), *Smart Composites in Construction*, 4(1), pp. 81-90 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V4N1\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V4N1_2023) (in Russian).
6. **Hasanova, M.N.** (2006) *Interaction of religious and secular in the spiritual culture of Derbent*. PhD. Makhachkala (in Russian).
7. **Kudryavtsev, A.A.** (1994) *Ancient Derbent*. Makhachkala: Dagestan. kn. izd-vo (in Russian).
8. **Kudryavtsev, A.A.** (1993) *Feudal Derbent: ways and patterns of city development in the VI–mid. XIII cent.* Moscow: Nauka (in Russian).
9. **Khan-Magomedov, S.O.** (1979) *Derbent. Mountain Wall. Auls of Tabasaran*. Moscow: Iskusstvo (in Russian).
10. **Khan-Magomedov, S.O.** (2002) *Architecture of Dagestan: Derbent fortress and Dag Bars*. Iss. 5. Moscow: Lad'ya (in Russian).
11. **Ibn Al-Faqih al-Hamadani.** (1902) *The Book of Countries* / N.A. Karaulova lane. Tiflis: Tip. Kants. Glavnonach. Grazhd. Ch. na Kavkaze (in Russian).
12. **Shikhsaidov, A.R.** (1984) *Epigraphic monuments of Dagestan X-XVII centuries*. Moscow: Nauka (in Russian).
13. **Dumas, A.** (1988) *Caucasus*. Tbilisi: Izd-vo «Merani» (in Russian).

Received 30.10.2023

Approved after reviewing 12.12.2023

Accepted 18.12.2023



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.023

# Доступная Арктика

**С.В. Расторгуев**

**Семен Васильевич Расторгуев**

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

*rastorguevsv@ystu.ru*



*Рассматривается проект освоения Арктической зоны Российской Федерации и побережья Северного Ледовитого океана, создание обслуживающей и поддерживающей инфраструктуры Северного морского пути. Представлены данные предпроектного исследования территории и показана необходимость ее логистического насыщения с целью повышения эффективности добычи полезных ископаемых и кратного повышения объемов транспортируемых грузов. Для реализации идей предложены новые типы арктических баз и поселений на основе геометрии геодезических куполов, обладающих рядом технических преимуществ и эстетической выразительностью. В основу концепции поселений предлагается заложить принципы модульности, взаимозаменяемости отдельных модулей и их составных частей, максимального снижения веса и упрощения транспортировки. С целью повышения автономности арктических поселений предлагается установить ветровую энергоэкологическую и ряд других инженерных систем.*

**Ключевые слова:** архитектура Арктики, Северный морской путь, модуль, геодезический купол, энергоустойчивость, ветроэнергетика

**Для цитирования:**

Расторгуев С.В. Доступная Арктика // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 4. С. 89-105. URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4_2023)



SCIENTIFIC ARTICLE

# Accessible Arctic

**S.V. Rastorguev**

**Semyon V. Rastorguev**

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

*rastorguevsv@ystu.ru*



*The article considers the project of development of the Arctic zone of the Russian Federation and the Arctic Ocean coast, the creation of servicing and supporting infrastructure of the Northern Sea Route. The authors present data from a pre-project study of the territory and show the need for its logistical enrichment in order to increase the efficiency of mineral extraction and multiply the volume of transported cargo. To realise these ideas, the authors propose new types of Arctic bases and settlements based on the geometry of geodesic domes, which have a number of technical advantages and aesthetic expression. The authors propose to base the settlement concept on the principles of modularity, interchangeability of individual modules and their component parts, maximum weight reduction and simplified transport. We propose to install wind energy-ecological and a number of other engineering systems to increase the autonomy of Arctic settlements.*

**Key words:** Arctic architecture, Northern Sea Route, module, geodesic dome, energy stability, wind power engineering

**For citation:**

Rastorguev, S.V. (2023) Accessible Arctic, *Smart Composite in Construction*, 4(4), pp. 89-105 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4_2023)



## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы возросла популярность архитектурных конкурсов по созданию лунных и марсианских баз (Moontopia, NASA 3D printed Mars Habitat) [1,2], а также направленных на освоение спутника Юпитера Европа (Fondation Jacques Rougerie). Часть конкурсов проводится на высочайшем профессиональном уровне: в состав жюри входят специалисты по инженерии космических систем и непосредственно космонавт. Это приводит к созданию проектов, качественных не только с архитектурной, но и инженерных позиций. Однако среди экспертов бытует мнение, что отправлять человека для исследования даже ближайшего космоса экономически нецелесообразно; с таким заданием лучше и дешевле справятся роботы. С другой стороны, всего в тысячах, а не миллионах или миллиардах километров существуют совершенно пустынные территории Земли, где подобные наработки могут быть применены, поскольку исходные данные во многом совпадают (хотя климатические условия мягче). Речь в данном случае идет об Арктике и проектировании там арктических баз и поселений.

Первоначально исследованы требования, предъявляемые к архитектуре и строительству в климатических и логистических условиях Арктической зоны России. В результате сделаны выводы, что традиционные архитектурные и конструктивные решения, применяемые в этих регионах, не оптимальны. В связи с этим в настоящей работе представлен проект «Доступная Арктика», призванный продемонстрировать, как могла бы выглядеть архитектура на побережье Северного Ледовитого океана с учетом реальных условий.

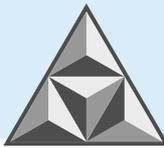
В основе геометрических и конструктивных решений, принимаемых в проекте, лежит ряд разработок (в частности, геодезические купола), примененных Б. Фуллером в 1940-х годах [3] и затем, в конце XX – начале XXI столетий, уже в крупных постройках архитекторов Н. Гримшоу и Н. Фостера [4]. Также рассмотрен проект «Новый элемент расселения» И.Г. Лежавы и А.Э. Гутнова [5] и учтен реальный опыт проектирования арктических и антарктических баз. Инновационные подходы к поиску новой геометрии архитектурных конструкций в сочетании с энергоэффективностью сооружений сведены в концептуальных проектах Биосити [6] и Боровое-Биосити [7], а часть наработок применена в настоящей статье.

Следует заранее отметить, что рассматриваемый концептуальный вариант проекта «Доступная Арктика» рассчитан на отдаленную перспективу, поскольку строительство автомагистрали по побережью Северного Ледовитого океана вдоль Северного морского пути – дело будущего [8]. Однако реализация локальных частей проекта – отдельных поселений с расчетом на постепенное создание логистической инфраструктуры, связывающей их, является задачей настоящего времени и ближайшего будущего.

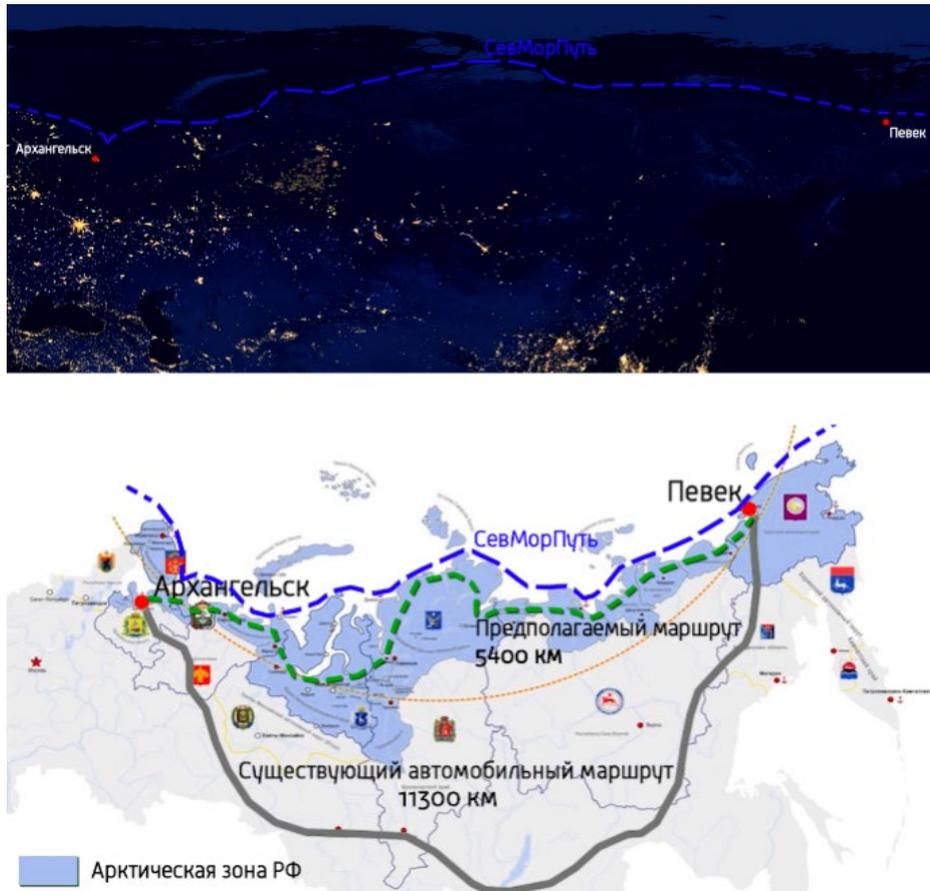
Об актуальности проекта свидетельствует и тот факт, что он высоко оценен сотрудниками отдела перспективных разработок АО «ТВЭЛ» (Росатом): выиграл закрытый конкурс, проводимый на тему развития Северного морского пути. Данный проект был представлен на XII Международном форуме «Арктика: настоящее и будущее», а также участвовал в экспозиции Госкорпорации Росатом на выставке «Армия-2022».

## ПРЕДПРОЕКТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Если обратить внимание на ночной космический снимок территории России, то по светящимся точкам городов и линиям дорог можно оценить реальную плотность населения и освоенность территорий. Более половины территории страны, особенно северо-



восточная ее часть – практически пустует (рис. 1). Развитие Северного морского пути создает своеобразную ось активности в Арктической зоне России.



**Рис. 1.** Ночной космический снимок территории РФ, траектория Северного морского пути и предполагаемый маршрут его обслуживания

**Fig. 1.** Night space image of the Russian Federation territory, the Northern Sea Route trajectory and the proposed route of its service

Преобразование побережья Северного Ледовитого океана и его насыщение объектами, необходимыми для обслуживания маршрута, ремонта судов и безопасности перевозок, приведет к возникновению новых населенных пунктов. В дальнейшем появится необходимость объединения единой магистралью новых и существующих прибрежных городов и поселков. Даже эстетически светящийся высокотехнологичный объект в бескрайней арктической пустыне не только развеет тьму полярной ночи, но и визуально закрепит на спутниковых снимках северную континентальную границу страны. Кроме того, необходимость сокращения магистрали, связывающей восток и запад страны, уже долгое время обсуждается специалистами. Согласно схеме, представленной на рис. 1, такая магистраль способна почти в два раза сократить маршрут между северо-западом и северо-востоком России (в данном случае в точках начала и конца магистрали расположены города Архангельск и Певек).

В условиях экстремального арктического климата и затрудненной логистики возникает необходимость использовать принципиально новый подход к выбору строительных конструкций и материалов. Целью настоящей работы является возможность создания автономных поселений с применением нестандартных строительных и архитектурных технологий.

Для начала обозначим преимущества арктических регионов, а также сложности, препятствующие полноценной реализации их потенциала.



Роль Арктики как кладези огромных запасов природных ресурсов неопределима. В Арктической зоне России осуществляется добыча 91% природного газа и сосредоточено 80% газа промышленных категорий. Здесь также содержатся запасы апатитового концентрата, 50-90% ценных металлов – от никеля до вольфрама, более 95% редкоземельных элементов, свыше 98% платиноидов, около 90% запасов золота и серебра, 99% алмазов, а также дефицитные руды марганца, хрома и титана. На шельфе и в арктических архипелагах выявлены запасы и ресурсы россыпного олова, полиметаллов, флюорита и самоцветов. Имеются предпосылки к открытию месторождений меди, фосфоритов, железа. Общие кондиционные прогнозные запасы залегающих здесь углей оцениваются минимум в 780 млрд. т, из них 599 млрд. т – энергетических и 181 млрд. т – коксующихся. Стоимость минерального сырья в недрах арктических районов России оценивается в 30 трлн. долларов. При этом степень разведанности и освоения недр не превышает 5-7% [9].

Кроме ресурсного потенциала, основными преимуществами освоения Арктики являются:

- создание новых транспортно-логистических систем, которые открывают дорогу к северным морям, прокладывают альтернативные транзитные пути и по-новому направляют потоки мировой торговли, что позволит Арктике стать одним из узловых транспортных и промышленных районов планеты;
- сокращение сроков доставки грузов из европейской части в азиатскую, по сравнению с традиционным маршрутом через Суэцкий канал;
- растущее значение в военно-политическом отношении.

Вместе с тем уникальные природно-климатические условия накладывают на приарктические государства определенные обязательства в сфере охраны окружающей среды.

Для эффективного использования потенциала Арктики можно сформулировать задачу соединения материковой и портовой инфраструктуры в единую логистическую систему. В условиях удаленности территории от основных промышленных центров страны возникает необходимость строительства разветвленной сети железных и автомобильных дорог: с одной стороны – для поддержания высокого уровня добычи полезных ископаемых, с другой – для снабжения арктических регионов.

Основное преимущество Северного морского пути заключается в том, что его использование позволяет значительно (на 14-22 сут.) сократить время доставки полярных грузов на рынки стран АТР. По предварительным прогнозам, восточный участок Северного морского пути будет открыт для круглогодичного судоходства после ввода в эксплуатацию ледоколов «Лидер» с 2028 г. [10, 11].

Возникает резонный вопрос: почему сейчас, при всех описанных преимуществах, арктические регионы России пустыны?

Это объясняется следующими причинами:

- отсутствуют развитые сети дорог; из-за высокой ветровой нагрузки дорожное полотно быстро «заметается», покрывается снегом;
- отсутствует необходимая оперативная помощь (медицинская, техническая) и привычные способы оповещения о ее необходимости;
- слабо развиты коммуникации – энергетические, информационные, телекоммуникационные; сети присутствуют локально, в непосредственной близости от населенных пунктов;
- «инфраструктурный вакуум» (отсутствие автозаправочных станций, магазинов и дорожных гостиниц на многих отрезках дорог);
- тяжелые климатические условия (температура на побережье Северного Ледовитого океана зимой  $-25...-55$  °C и летом  $-8...+8$  °C) и особенности смены суток (полярная ночь и полярный день) [12].



Транспортные возможности и мощности по добыче полезных ископаемых в арктических регионах, а также геополитические предпосылки к развитию данной территории должны обеспечить условия для преодоления указанных недостатков.

## ПРИНЦИПЫ АРКТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Проект «Доступная Арктика» создан для того, чтобы наиболее экономичным способом начать освоение региона и в полной мере реализовать его потенциал. Сформулируем требования, которые предъявляются к создаваемому арктическому поселению или многофункциональному комплексу:

- транспортная свобода и быстрая доступность;
- энергетическая, информационная и коммуникационная связь между поселением и «большой землей»;
- доступность выбора места проживания и ограниченное расстояние от него до места работы и общественных центров;
- высокая скорость доставки грузов и материалов между поселениями;
- наличие в непосредственной доступности мест досуга, поддержания физической формы и здоровья обитателей;
- обеспечение возможности проводить время в условиях оптимального «внутреннего» климата и минимально соприкасаться с внешними неблагоприятными погодными условиями.

Рассмотрим потенциальный маршрут между городами Архангельск и Певек вдоль побережья Северного Ледовитого океана. Протяженность магистрали составляет 5400 км. Чтобы обустроить данный маршрут, необходимы колоссальные затраты ресурсов, сопоставимые с созданием лунной или марсианской базы. Климатические условия на полярных территориях лучше инопланетных, но при этом традиционное строительство обходится на порядок дороже, чем в средних широтах. В этой связи представляется логичным заимствовать некоторые черты создания космических поселений.

Исходные данные для строительства на арктических территориях:

- дорогостоящая логистика требует снижения массы и компактности конструкций;
- защита от внешних погодных условий при минимальных затратах на поддержание внутреннего микроклимата приводит к необходимости максимально использовать энергосберегающие конструкции и технологии их возведения;
- отсутствие подходящих грунтов для строительства требует применения прочных элементов с расчетом опоры на поверхность грунта без заглубления и легких составных частей – модулей, из которых должны состоять крупные комплексы;
- необходимость максимальной энергоустойчивости арктических поселений при отсутствии или непостоянном внешнем энергоснабжении;
- отсутствие дружелюбной внешней среды для обитателей проектируемых поселений, которое требует использования биотехнологий, создания оранжерей и человеко-ориентированных пространств внутри комплексов.

Для адекватного ответа на эти вызовы целесообразно обратиться к модульному проектированию. Разнообразие функций сложных обитаемых комплексов приводит к различию форм проектируемых объектов и модулей; при этом необходимо придерживаться единого принципа их создания. Другими словами, отдельные модули – это «буквы» единого алфавита, в правильном сочетании создающие «законченную фразу». В размерах и в формах каждая «буква» не выходит за определенные рамки.



За основу модуля взят геодезический купол, построенный из одинаковых и равных по размерам геометрических элементов – трехгранных или шестигранных. Максимальная унификация и взаимозаменяемость модулей и образующих их ячеек важна для повышения эффективности строительства и снижения затрат на эксплуатацию комплекса.

Одной из базовых «букв» нашего «алфавита» является биоклиматический модуль, который постараемся рассмотреть наиболее подробно.

Кроме биоклиматических модулей, обладающих, в первую очередь, функцией жилья, в проекте «Доступная Арктика» разработаны и другие виды модулей, их комбинаций и сооружений:

- механизированные базы и склады купольного типа;
- арктические теплицы и оранжереи;
- защитные светопрозрачные конструкции туннельного типа (для стационарных дорог) и из лежневых настилов (для временных дорог);
- энергетические модули, в частности ветрогенераторы, адаптированные для арктического климата.

Автономные арктические поселения собираются из различных типов модулей. Основу большинства модулей составляет купольная оболочка. Это каркасная конструкция, к которой крепятся унифицированные купольные ячейки. Купольные модули соединяются между собой тамбурами или шлюзами. Сохранение климата обеспечивается герметичностью конструкции ячеек и мест их примыкания к каркасу.

Ячейка является конструктивным элементом купольного модуля. Она изготавливается из композитно-алюминиевого профиля и реального материала ETFE (этилентетрафторэтилена) – частично фторированного сополимера этилена и тетрафторэтилена [13] и представляет собой герметичную многослойную пленочную конструкцию с высокой теплоизоляцией. Пленка ETFE (ЭТФЭ) характеризуется химической стойкостью, термо-, атмосферо-, био- и огнестойкостью, антиадгезионными и антифрикционными свойствами, имеет высокие механические и диэлектрические характеристики, но низкую диффузионную проницаемость (в 8-30 раз ниже полиэтилена). Структурные ячейки с использованием данного материала имеют малый вес. Масса 1 м<sup>2</sup> поверхности трехслойной пневматической конструкции составляет около 2-3 кг (1% от массы эквивалентного структурного остекления).

Для проекта арктического поселения ценными являются следующие характеристики оболочки модулей:

- высокая прочность на разрыв; относительное удлинение при разрыве составляет 150-400%;
- пожаробезопасность; пленка оболочки относится к группе горючести Г1 (не распространяет горение, не образует капель при плавлении);
- широкий рабочий диапазон температур наружного воздуха, что важно для арктического климата (отсутствует растрескивание при резком изменении температуры);
- долговечность (расчетный ресурс – более 50 лет);
- прозрачность для ультрафиолетового излучения; один слой пленки толщиной 250 мкм пропускает 98% солнечных лучей;
- стойкость к химической коррозии (инертность к кислотным, щелочным и другим агрессивным средам); объект может эксплуатироваться как в условиях жилого арктического поселения, так и в условиях промышленных зон, в том числе – месторождений угля, руды и др.;



- устойчивость к ветровым нагрузкам (упругая оболочка);
- адаптивность к снеговым и ливневым нагрузкам (на поверхности не накапливаются большие объемы снега, льда или ливневых осадков, которые могут вызвать локальный прогиб или разрушение пневмоконструкции и несущего профиля); самоочищаемость наружной поверхности, препятствующая намерзанию льда, что связано с отсутствием микропор и высоким коэффициентом поверхностного натяжения;
- энергоэффективность (количество слоев материала в ячейках – два): чем больше в ячейке слоев материала, тем выше ее сопротивление теплопередаче (по аналогии со стеклопакетом);
- возможность регулировки светопрозрачности оболочки модулей; на слои пленки предварительно наносится рисунок в виде множества полос, при подаче избыточного давления между двумя слоями создается эффект муара или жалюзи, тем самым регулируется количество пропускаемого оболочкой света;
- подавление шума (эластичная пленка частично поглощает шум, создавая комфортную среду для находящихся внутри модуля людей).

Что касается основания конструкций купольных модулей, в проекте не предполагается заглубление в грунт, поскольку вечная мерзлота не создает устойчивой опоры для сооружений и может оттаивать со временем. Для оптимизации уборки снега и откапывания стен модулей при снежных заносах большую часть модулей предлагается устанавливать на конструкцию высотой от 2 м (каркас без оболочки). Также возможен монтаж модулей на поверхности земли. В обоих случаях теплоизоляционный элемент основы пола купольного модуля – подложка из переработанной резины. Она служит для выравнивания рельефа и установки каркаса. Основание выдерживает нагрузку 60 т и имеет высокие теплоизоляционные свойства.

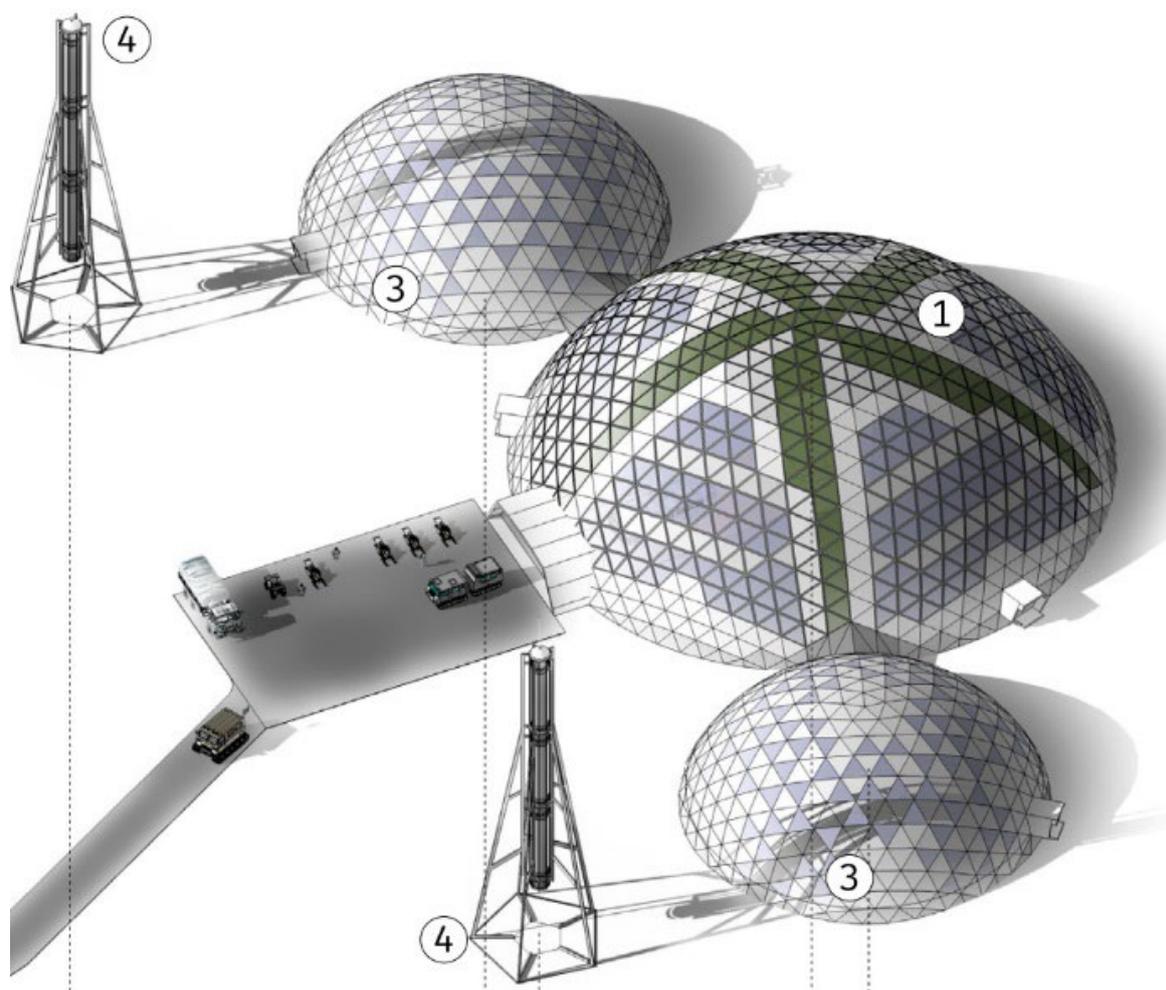
Ветровая энергоэкологическая система предполагает обеспечить небольшие модульные комплексы электроэнергией в сочетании с аккумуляторами и дизель-генераторами для пиковых нагрузок. В арктических регионах на побережье Северного Ледовитого океана большую часть года скорость ветра достаточно велика (до  $100 \text{ км}\cdot\text{ч}^{-1}$ ), однако традиционные ветрогенераторы здесь не годятся, поскольку они подвержены намерзанию льда на лопасти, что останавливает их вращение и может привести к разрушению из-за непрогнозируемого увеличения веса.

Существуют ветроэнергетические установки арктического исполнения VETROX Arctic GE-50 мощностью 50 кВт [14]. Также в настоящее время в разработке находится левитирующая на магнитной подвеске, вертикально-осевая двухгенераторная трехмодульная энергоустановка ВОВЭ МАГЛЕВ-Т, использующая модифицированные электрические проводники с низким сопротивлением (МЭПНС), мощность которой предполагается довести до 150-200 кВт [15]. Оба типа ветро-энергоустановок предлагается использовать в проекте.

## АРКТИЧЕСКИЕ МОДУЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

Приведем описание компоновок модулей для формирования арктических поселений.

**Базовый лагерь из купольных модулей** (рис. 2) рассчитан на проживание и работу 30-50 чел. Лагерь состоит из купольных модулей радиусом 6 м, высотой 5 м и площадью  $111 \text{ м}^2$ .



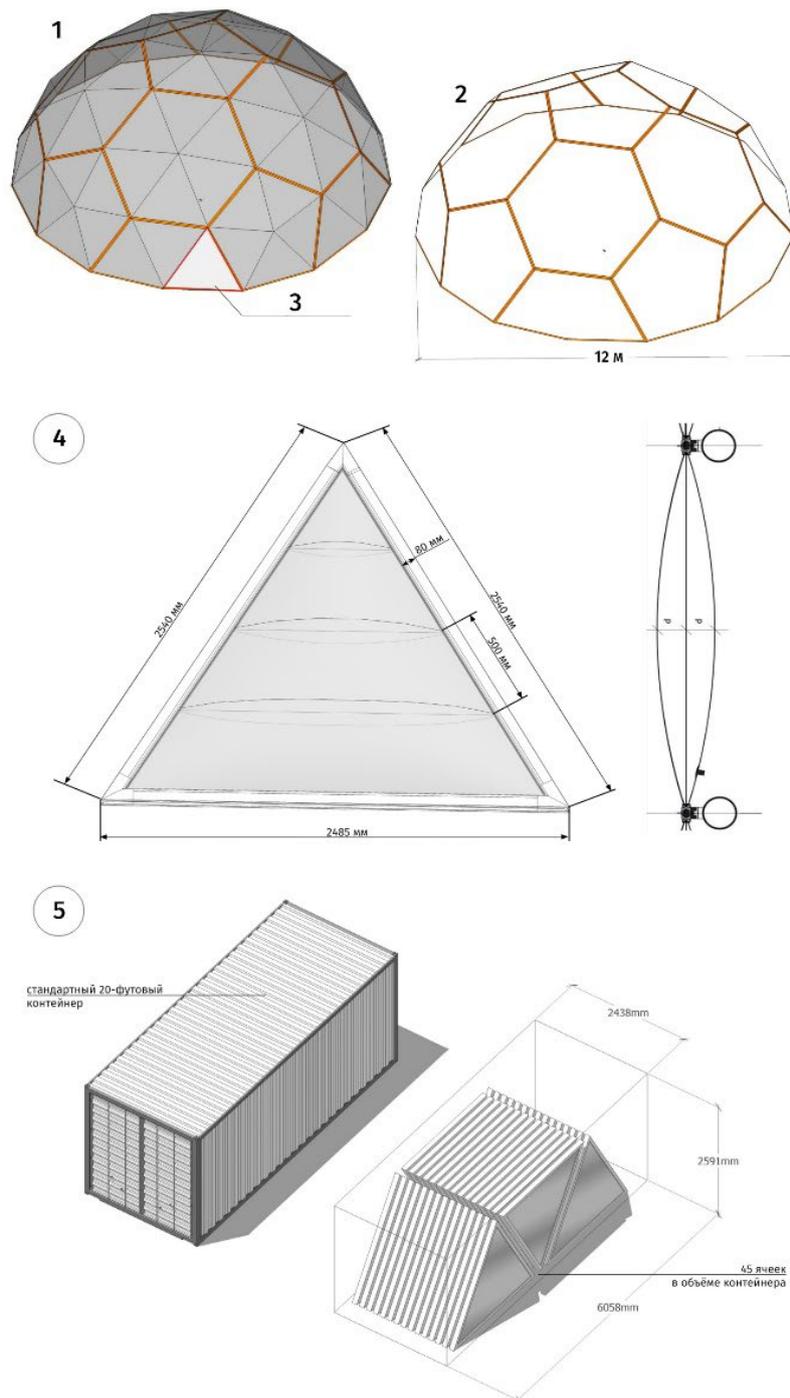
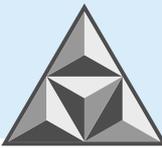
**Рис. 2.** Базовый лагерь: 1, 2 – жилой и рабочий модуль; 3 – складские и обслуживающие модули; 4 – вертикально-осевые ветро-энергоустановки

**Fig. 2.** Base camp: 1, 2 – living and working module; 3 – storage and service modules; 4 – vertical-axis wind power plants

Модули могут стыковаться для получения лагеря с различными площадями и функционалом. Кроме основного типа модулей, возможно также применение более крупных, стыковка которых осуществляется с помощью типовых элементов. Для сбора базовых конфигураций достаточно применить элементы двух видов. Высота в точке стыка от уровня «чистого» пола до низа конструкции стыковочного элемента составляет 2.2 м. Применение мелких модулей затруднительно из-за небольшой высоты соединительных элементов (< 2 м).

Модуль включает треугольные ячейки, герметично закрепленные на каркасе из шестигранных металлических рам. Число ячеек в стандартном модуле – 75 шт. Модуль монтируется без применения специальной техники в двух вариантах – на уплотненном грунте с использованием подложки из переработанной резины и на опорных каркасных ячейках для защиты лагеря от заметания снегом в условиях арктического климата. Срок эксплуатации готового модуля составляет 10 лет. При необходимости, кластер из пяти ячеек заменяется на входной тамбур. Максимальный размер ячеек подобран таким образом, чтобы была возможность транспортировать их в большом количестве в стандартном 20-футовом контейнере (рис. 3).

Согласно проведенному моделированию (рис. 3), один контейнер вмещает 45 ячеек. Таким образом, в пяти контейнерах помещаются материалы для трех модулей (225 ячеек и элементы каркаса).



**Рис. 3.** 1, 2 – купольный модуль и его каркас; 3 – стандартная ячейка модуля; 4 – структура ячейки: профиль и трехслойная пневматическая конструкция из ЭТФЭ пленки;

5 – размещение 45 ячеек в стандартном 20-футовом контейнере для транспортировки

**Fig. 3.** 1, 2 – dome module and its frame; 3 – standard module cell; 4 – cell structure: profile and three-layer pneumatic structure made of ETFE film; 5 – layout of 45 cells in a standard 20-foot shipping container

Стандартная ячейка состоит из алюминиевой рамы, которая закрывает двухкамерную емкость из прозрачной ETFE-пленки. Камеры заполнены азотом.

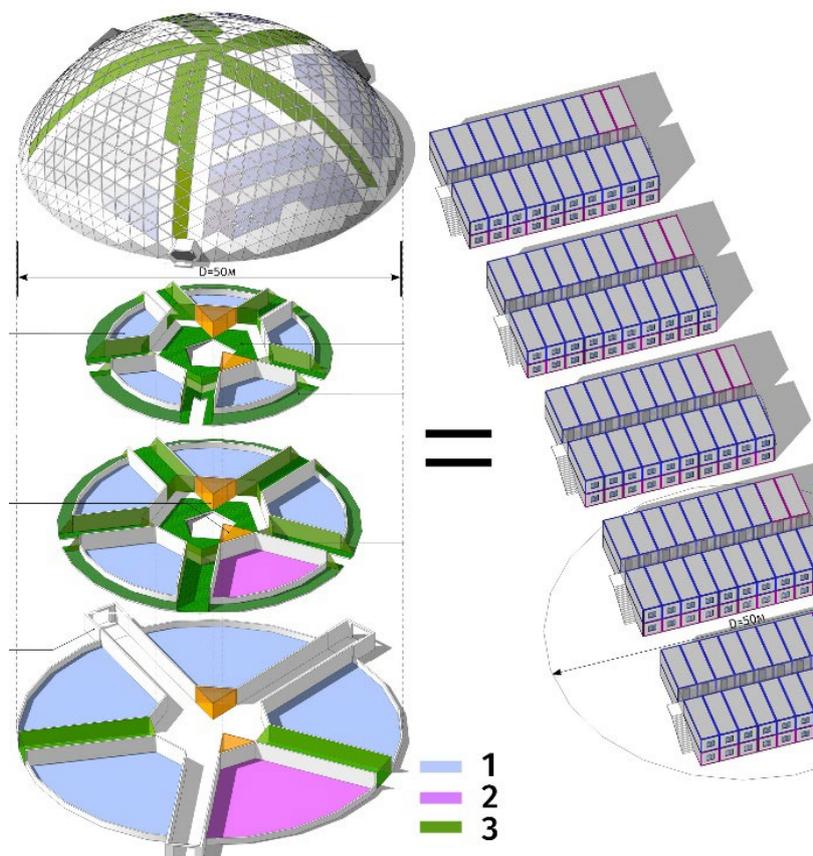
Герметичная оболочка купола-модуля из ячеек обеспечивает высокую степень теплоизоляции. Конструкция рамы создана по принципу двухкамерного стеклопакета и препятствует промерзанию ячейки в узких местах. В раме присутствует съемный элемент, который позволяет быстро загрузить «стеклопакет» либо удалить емкость при повреждении.



Сама двухкамерная емкость имеет встроенный внутренний каркас из пенополиуретана, который обеспечивает упрощенный монтаж в раму.

Общие требования, предъявляемые к ячейкам: работа при разнице температур до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  снаружи и  $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$  внутри; ветровая нагрузка на внешний слой, эквивалентная скорости ветра до  $50\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  при влажности воздуха до 100%. Оболочка модуля позволяет регулировать уровень проникновения света.

**Биоклиматический модуль** – это светопрозрачный пленочный каркасный модуль с автономным энергообеспечением, управляемым климатом и организацией жилой функции (рис. 4).



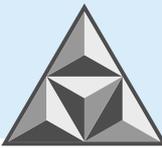
**Рис. 4.** Биоклиматический модуль, схемы уровней и сравнение по вместимости со стандартным методом вахтового расселения в блок-контейнерах (5 двухэтажных корпусов по 20 контейнеров):

1 – жилая функция; 2 – обслуживание; 3 – озелененные зоны

**Fig. 4.** Bioclimatic module, level diagrams and comparison of capacity with the standard method of shift accommodation in block containers (5 two-story buildings with 20 containers each):

1 – residential function; 2 – maintenance; 3 – green areas

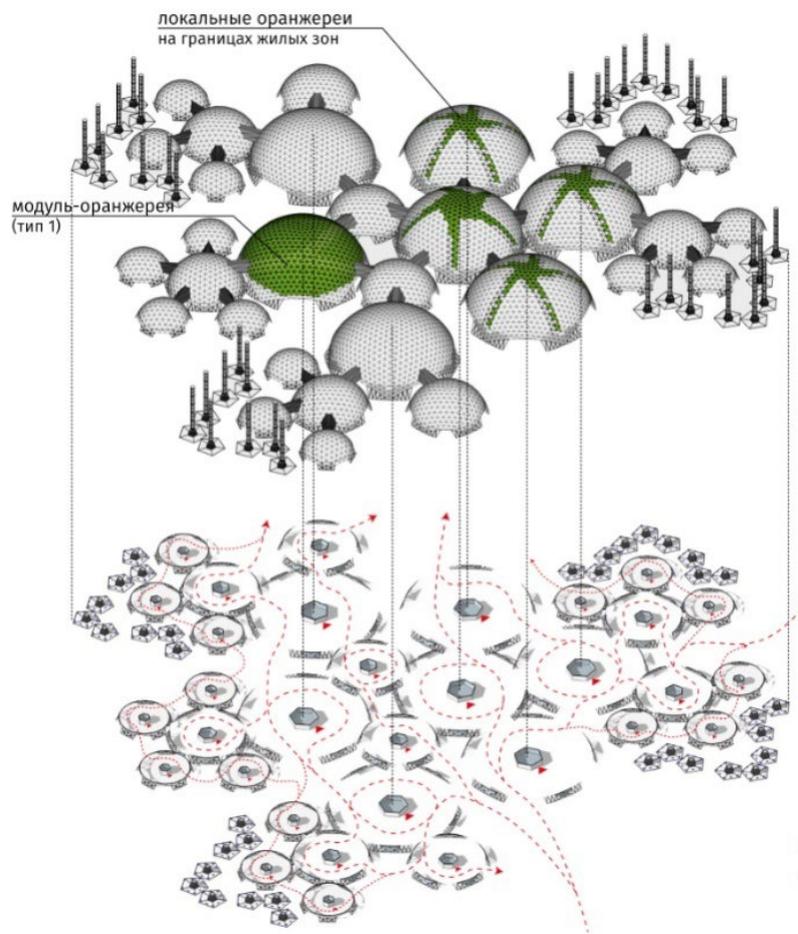
Модуль обладает радиальной планировкой, оптимальной для купольной формы. Такая планировка позволяет эффективно использовать всю площадь на трех уровнях под сферической поверхностью. Модуль рассчитан на постоянное пребывание 110 поселенцев. Здесь достигается разумное сочетание частного и общественного пространства. Так, общедоступное теплое пространство внутри купола является подобием пешеходной улицы. Транзитные пешеходные потоки внутри одного модуля разделены. Окружность модуля в плане формируют универсальные функциональные сегменты равной площади и размеров, которые взаимозаменяемы. Это позволяет реализовать различный набор функций без изменения конструктивной структуры модуля. Внутри биоклиматического модуля создается естественный микроклимат и функционирует устойчивая экосистема. Это является важным условием для постоянного проживания персонала в условиях Крайнего Севера и полярной



ночи. Возможность выращивать собственные фрукты и овощи создает иллюзию жизни в привычных климатических условиях и одновременно – иллюзию базы отдыха. Также предлагается опция изменения общей освещенности общественных зон для имитации смены времени суток.

Компактный «теплый контур» способствует сокращению затрат на поддержание комфортной температуры. Активно задействованы общественные пространства и социальные связи. «Современность» жилой среды предполагает длительную эксплуатацию комплекса без морального устаревания. «Внутренний оазис» расположен в центре модуля, благодаря чему персонал находится в оптимальных климатических условиях, в постоянном контакте с живой природой, что облегчает адаптацию к условиям Крайнего Севера.

**Крупный модульный комплекс «Арктический город»** – наиболее масштабный комплекс, представленный в проекте; его вместимость – до 1500 чел. (рис. 5).



**Рис. 5.** «Арктический город» из разных типов модулей, связанных теплыми переходами.

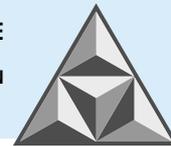
Транспортная схема в сочетании со снегоуборкой на уровне 1

**Fig. 5.** “Arctic city” made of different types of modules connected by warm passages.

Transport scheme in combination with snow removal at level 1

В данном модульном комплексе предусмотрена автономность функционирования за счет ветроэнерготурбин и встроенных оранжерей. Комплекс оснащен автономными энергетическими элементами и горизонтальными ветряками, функционирующими при отключении от внешней энергосети.

Этот комплекс общей площадью 49600 м<sup>2</sup> собирается из трех типов стандартных ячеек и универсальных каркасных элементов. Он содержит жилые и рабочие модули, зоны отдыха, складские помещения, зоны ремонта и хранения техники и т.д.



Каждый модуль имеет собственный вход с тамбуром. Кроме того, комплекс оснащен оранжереями для выращивания овощей. Общая оранжерея предназначена для обеспечения овощами всех жителей комплекса. Локальные оранжереи расположены на стыках жилых зон (на разных уровнях). Предусматривается 80 локальных оранжерей в четырех жилых модулях на четырех уровнях. Каждая оранжерея рассчитана на 20 жителей.

Переходы между модулями расположены на уровне 1-2 этажей. Входы в модули комплекса находятся на уровне земли. Предусмотрен проезд техники в зону крытой стоянки на 15 увеличенных машиномест (11×3 м). Ширина проезда составляет 14.0 м, высота – 4.5 м. Зона стоянки имеет прямую коммуникацию с зоной обслуживания техники. Транспортная схема связана с системой уборки и вывоза снега, при том функциональные уровни большинства модулей начинаются на уровне второго этажа.

В комплексе запроектированы инженерные системы с расчетом на их автономность и независимость от внешних подключений. Система очистки канализационных стоков предназначена для накопления и очистки сточных вод при отсутствии местных стационарных систем канализации. Она включает элементы биопереработки. Очистка осуществляется до норм сброса в водоемы рыбохозяйственного назначения. Для минимизации выбросов отходов в окружающую среду, предотвращения распространения заболеваний, и загрязнения водоемов и грунтовых вод в составе комплекса предусмотрена установка утилизации. Автономность обеспечения комплекса достигается благодаря системе очистки воды, поступающей из открытых и подземных источников.

Влияние комплекса на вечную мерзлоту исключено. Срок его эксплуатации не ограничивается 10 годами и может продлеваться. Срок службы пленки и элементов каркаса – 30 лет. Большинство элементов сборки – стандартные треугольные ячейки размером 2.5×2.5×2.5 м. Элементы каркаса и ячейки перевозятся в морских 20-футовых контейнерах.

Все модули комплекса объединены в замкнутую систему с внутренним микроклиматом. В большинстве случаев жителям не требуется покидать эту систему, чтобы осуществлять ежедневную деятельность и рабочие действия.

Данную разработку можно представить как технологическую основу для создания локальных проектов в Арктической зоне России. Полученный в результате точечного проектирования опыт можно рассматривать как «обратную связь» и корректировать на ее основе общую концепцию. Многие вопросы потребуют в дальнейшем научно-обоснованного подхода к их решению: «Большое арктическое путешествие» только начинается. Так, следует более подробно рассмотреть экологические проблемы арктической территории (очистка побережья океана от накопившегося антропогенного мусора, его переработка и рециркуляция [16]). Кроме того, проектирование дорог выполнено пока на концептуальном уровне; этот обширный научный пласт, несомненно, будет сопровождаться временными затратами на детализацию [8, 17].

## ВЫВОДЫ

Рассматриваемый проект является объемным, как сама тема освоения Арктики. Предлагаемые универсальные модули проекта «Доступная Арктика» необходимо адаптировать к определенной территории или осуществить реконструкцию на новом технологическом уровне конкретного населенного пункта, расположенного на побережье Северного Ледовитого океана (в том числе – заброшенного).

В ходе реализации проекта представляется перспективным также оценить возможности использования инновационных технологий (3D-печать), автоматизированной сборки



сооружений и другие аспекты. Возрастающая роль Арктики в мировой экономике и полноценный запуск Северного морского пути должны ускорить востребованность проекта.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Внеземная архитектура: 9 проектов лунных колоний // *Naked Science*: [сайт]. 2018. URL: <https://naked-science.ru/article/nakedscience/vnezemnaya-arhitektura-9>
2. 3D-Printed Habitat Challenge // *The National Aeronautics and Space Administration*. URL: <https://www.nasa.gov/prizes-challenges-and-crowdsourcing/centennial-challenges/3d-printed-habitat-challenge/>
3. **Токарев Е.А.** Купола Б. Фуллера и его последователей в современной архитектуре URL: [http://book.uraic.ru/project/conf/txt/005/archvuz18\\_pril/30/template\\_article-ar=K41-60-k41.htm](http://book.uraic.ru/project/conf/txt/005/archvuz18_pril/30/template_article-ar=K41-60-k41.htm)
4. **Ален И.** Николас Гримшоу. Проект Эдем // *Проект классика*. 2002. № 4. С. 28. URL: [www.projectclassica.ru](http://www.projectclassica.ru)
5. **Лежава И.Г.** НЭР Триеннале. URL: <https://ilya-lezhava.livejournal.com/2475.html>
6. **Расторгуев С.В., Кудряшов М.Н.** Альтернатива. М.: Издательские решения, 2022. С. 68-76.
7. **Кудряшов М.Н., Расторгуев С.В.** Боровое-Биосити - Biocity // *Портал «Архитектура и энтропия»* [сайт]. 2021. URL: <https://cih.ru/kz/index.html>
8. Доступная Арктика // *Cih.ru блог*: [сайт]. URL: <https://cih.ru/wp/bld/2023/08/31/arctic/>
9. **Орлов Д.** Развитие Арктической зоны России и основные вызовы для ее освоения // *ИА REGNUM*. 2018. URL: <https://regnum.ru/article/2407690>
10. Арктика – мировой природный ресурс // *Проектный офис развития Арктики*: [сайт]. 2019. URL: <https://goarctic.ru/news/arktika-mirovoy-prirodnyy-resurs/>
11. **Подстрехина В.В.** Освоение Арктики равно освоению космоса // *Газовая промышленность*. 2014. № 8(710). С. 44-45.
12. **Тагиева Н.К., Онегин В.Е.** Дорога в Арктику Стратегия развития и транспортная инфраструктура // *Деловой журн. Neftegaz.RU*. 2018. № 5(77). С. 58-61.
13. **Мороз А.А.** Преимущества новейшего полимерного материала – пленки ETFE // *Евростройпрофи*. 2015. № 5. URL: <https://lommata.ru/files/Evrostroyprofi.pdf>
14. Ветроэнергетическая установка арктического исполнения 50 кВт // *ЭнергоСток*: [сайт]. URL: <https://energystock.ru/arkticheskogo-ispolneniya/>
15. **Карначев П.И., Карначев И.П.** Градусы северной широты. Обеспечение энергосберегающей эффективности объектов теплоснабжения в условиях российской Арктики на основе концепции «Наилучших доступных технологий» // *Безопасность и охрана труда*. 2014. № 4(61). С. 52-54.
16. **Таюрский В.Г.** На вывоз из Арктики скопившегося металлолома не хватает денег. URL: <https://rg.ru/2021/02/04/reg-dfo/na-vyvoz-iz-arktiki-skopivshegosia-metalloloma-ne-hvataet-deneg.html>
17. **Толкачева К.В.** Проблемы организации строительства автомобильных дорог в условиях Арктики // *StudArctic Forum*. 2021. Т. 1, № 21. С. 95-101.

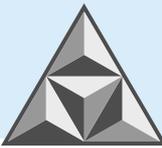
Поступила в редакцию 13.11.2023

Одобрена после рецензирования 29.11.2023

Принята к опубликованию 12.12.2023

## REFERENCES

1. Naked Science portal, (2018) *Extraterrestrial architecture: 9 projects for lunar colonies* [online]. Available at: <https://naked-science.ru/article/nakedscience/vnezemnaya-arhitektura-9> (in Russian).
2. 3D-Printed Habitat Challenge, *The National Aeronautics and Space Administration* [online]. Available at: <https://www.nasa.gov/prizes-challenges-and-crowdsourcing/centennial-challenges/3d-printed-habitat-challenge/> (in Russian).
3. **Tozarev, E.A.** *Domes of B. Fuller and his followers in modern architecture* [online]. Available at: [http://book.uraic.ru/project/conf/txt/005/archvuz18\\_pril/30/template\\_article-ar=K41-60-k41.htm](http://book.uraic.ru/project/conf/txt/005/archvuz18_pril/30/template_article-ar=K41-60-k41.htm) (in Russian).
4. **Allen, I.** (2002) Nicholas Grimshaw. Project Eden, *Project Classics*, (4) (in Russian).



5. **Lezhava, I.G.** *NER Triennale* [online]. Available at: <https://ilya-lezhava.livejournal.com/2475.html> (in Russian).
6. **Rastorguev, S.V. & Kudryashov, M.N.** (2022) *Alternative*. M.: Izdatel'skie resheniya (in Russian).
7. **Kudryashov, M.N. & Rastorguev, S.V.** (2021) Borovoe-Biocity, *Portal «Arhitektura i entropiya»* [online]. Available at: <https://cih.ru/kz/index.html> (in Russian).
8. Cih.ru blog, (2023) *Accessible Arctic* [online]. Available at: <https://cih.ru/wp/bld/2023/08/31/arctic/> (in Russian).
9. **Orlov, D.** (2018) Development of the Arctic zone of Russia and the main challenges for its development, *Inform. agent. REGNUM* [online]. Available at: <https://regnum.ru/article/2407690> (in Russian).
10. Arctic Development Project Office, (2019) *The Arctic is a global natural resource* [online]. Available at: <https://goarctic.ru/news/arktika-mirovoy-prirodnny-resurs/> (in Russian).
11. **Podstrehina, V.V.** (2014) Arctic exploration is equal to space exploration, *Gazovaya promyshlennost'*, 8(710), pp. 44-45 (in Russian).
12. **Tagieva, N.K. & Onegin, V.E.** (2018) Road to the Arctic Development strategy and transport infrastructure, *Delovoy zhurn. Neftegaz.RU*, 5(77), pp. 58-61 (in Russian).
13. **Moroz, A.A.** (2015) Advantages of the newest polymer material – ETFE film, *Evrostroyprofi*, 5 [online]. Available at: <https://lommata.ru/files/Evrostroyprofi.pdf> (in Russian).
14. EnergoStok. *Arctic wind power plant 50 kW* [online]. Available at: <https://energystock.ru/arkticheskogo-ispolneniya/> (in Russian).
15. **Karnachev, P.I. & I.P. Karnachev** (2014) Degrees of northern latitude. Ensuring energy-saving efficiency of heat supply facilities in the Russian Arctic based on the concept of “Best Available Technologies”, *Bezopasnost' i okhrana truda*, 4(61), pp. 52-54 (in Russian).
16. **Tayursky, V.G.** (2021) *There is not enough money to remove accumulated scrap metal from the Arctic* [online]. Available at: <https://rg.ru/2021/02/04/reg-dfo/na-vyvoz-iz-arktiki-skopivshegosia-metalloloma-ne-hvataet-deneg.html> (in Russian).
17. **Tolkacheva, K.V.** (2021) Problems of organizing the construction of highways in the Arctic, *StudArctic Forum*, 1(21), pp. 95-101 (in Russian).

Received 13.11.2023

Approved after reviewing 29.11.2023

Accepted 12.12.2023



## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция строго придерживается норм и правил международной публикационной этики.

Правовую основу обеспечения публикационной этики составляют международные стандарты: положения II Всемирной конференции по вопросам соблюдения добросовестности научных исследований, положения Комитета по этике научных публикаций (The Committee on Publication Ethics – COPE) и нормы раздела «Авторское право» Гражданского кодекса РФ.

Представление статьи в журнал подразумевает следующее:

- работа не была опубликована ранее в другом журнале;
- не находится на рассмотрении в другом журнале;
- все соавторы согласны с публикацией статьи;
- получено согласие (в явной или неявной форме) организации, в которой было проведено исследование.

При представлении рукописи в журнал авторы должны убедиться, что все цитирования оформлены корректно, указаны заимствованные источники в подписях к рисункам и надписям таблиц. Если таковые не приведены, предполагается, что рисунки и таблицы представляют собой плод авторской деятельности. Редакция осуществляет проверку статей на антиплагиат (не менее 70% оригинальности).

### **Авторские права**

Авторы, направляющие свои работы в журнал, соглашаются со следующим:

- 1) Авторы сохраняют за собой авторские права на работу и предоставляют журналу право первой публикации работы.
- 2) Авторы сохраняют право заключать отдельные контрактные договоренности, касающиеся распространения версии работы в опубликованном виде (например, размещение ее в институтском хранилище, публикация в книге), со ссылкой на оригинальную публикацию в этом журнале.

### **Приватность**

Имена и адреса электронной почты, введенные на сайте этого журнала, будут использованы исключительно для целей, обозначенных журналом; доступ к ним иных лиц и организаций для других целей не предоставляется.

### **ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ**

В журнале «Умные композиты в строительстве Smart Composite in Construction» печатаются работы преподавателей и сотрудников высших учебных заведений РФ, РАН, РААСН, а также других учебных и исследовательских подразделений стран, работающих в сфере промышленного и гражданского строительства и архитектуры.

#### **Перечень специальностей с указанием отраслей науки, которым отвечают рубрики журнала**

- 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические);
- 2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические);
- 2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические);
- 2.1.12. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура; технические)



### Статьи, направляемые в журнал, должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Работа должна соответствовать профилю журнала, обладать актуальностью, новизной, иметь прикладное значение (и/или теоретическое обоснование). Вопрос об опубликовании статьи или отклонении решает редакционная коллегия журнала, и ее решение является окончательным.

2. Статьи должны представлять конкретное изложение полученных автором результатов, без повторения одних и тех же данных в тексте, рисунках и таблицах.

3. Основной текст статьи должен быть подготовлен 12 кеглем, шрифт *Times New Roman*, интервал 1.1. Поля: верхнее и нижнее – 3 см, левое и правое – 2.5 см. Абзацный отступ – 0.75 см. Объем статьи – 7-15 страниц, включая список источников, таблицы (не более 5, ширина 8 см) и рисунки (не более 5, для обзорной статьи – не более 10, ширина 8 см), в том числе помеченные буквами *a*, *b*, *v* и т.д. Рисунки – в редакторе в *MS Excel* или *Origin*, без рамок, формулы – в *Chem Wind*. Они размещаются, как и подписи к ним, таблицы и заголовки, примечания, по тексту статьи. В раздел «Обзорные статьи» принимаются материалы объемом от 20-25 страниц.

При оформлении статьи рекомендуется избегать употребления любых сокращений, кроме общепринятых. При первом упоминании сокращенного термина обязательно приводится его расшифровка в полном виде. Рукописные вставки не допускаются. Кавычки оформляются елочкой. Текст набирается без нумерации страниц.

### Структура статьи

На первой странице рукописи слева проставляется индекс по универсальной десятичной классификации (УДК, шрифт 10 пт, прямой, *Verdana*, без отступа. После УДК пропускается строка, дается наименование работы по центру (шрифт 12 пт, прямой, полужирный, все буквы прописные, шрифт *Verdana*). Ниже по центру – инициалы, фамилия авторов (шрифт 11 пт, курсив, *Verdana*, полужирный). После фамилий авторов указываются их место работы: подразделение и название организации, почтовый адрес (шрифт 10 пт, курсив, *Verdana*). Отдельной строкой указывается электронный адрес авторов (курсив). Далее через интервал (1 строка) размещается аннотация (150-200 слов, выравнивание по ширине, размер шрифта 10 пт, курсив, отступ слева 1 см, шрифт *Times New Roman*). После аннотации и интервала (1 строка) полужирным шрифтом курсивом набирается *Ключевые слова* и приводят шрифтом *Times New Roman*, размер шрифта 10 пт, 5-8 словосочетаний (не курсив), без точки в конце.

Эти же данные, кроме УДК, представляются на английском языке, на отдельной странице.

Затем располагается текст статьи (шрифт 12 пт, прямой, *Times New Roman*), в котором через интервал выделяются разделы: ВВЕДЕНИЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ, ВЫВОДЫ (в обзорной статье выделяются ВВЕДЕНИЕ, названия подразделов курсивом, ВЫВОДЫ). Подписи к рисункам и названия таблиц представляют на русском и английском языке. Числа, не являющиеся целыми (десятичные), указывают через точку, например: 5.3 или 395.18.

Статья заканчивается разделом СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (шрифт 10 пт, *Times New Roman*). Количество цитированных источников – не менее 10, оптимальное – от 15 до 20. Желательно включать работы из журналов, входящих в список ВАК РФ, и не менее 2-3 работ, входящих в международные базы. В обзорных работах принимаются ссылки от 40-50 источников и выше. Под списком литературных источников через интервал слева курсивом приводятся слова: *Поступила в редакцию*, на следующей строке: *Одобрена после рецензирования*, на следующей



строке: *Принята к опубликованию*. Раздел Список источников дополнительно представляется на английском языке (REFERENCES, см. **Оформление литературных ссылок**).

4. В адрес редакции, кроме электронного варианта, по электронной почте направляют сведения об авторах, с указанием их ученой степени, ученого звания, места работы и занимаемой должности, адреса, телефона и e-mail, а также подписями, означающими согласие на опубликование работы.

### Формат

Редакция принимает тексты, сохраненные в программе *Microsoft Word* в форматах .doc или .docx. Материалы, не соответствующие вышеуказанным требованиям, не рассматриваются.

### Оформление литературных ссылок

Все русскоязычные литературные источники должны быть указаны на английском языке. Издания, которые не переводятся, необходимо указать транслитерацией в соответствии с общепринятыми международными правилами, в конце каждого такого источника должна стоять пометка (in Russian) (см. <http://www.cas.org/expertise/cascontent/caplus/corejournals.html>).

Для журнальной статьи должны быть указаны фамилии и инициалы всех авторов, название статьи, сокращенное название журнала, год, номер тома, номер или выпуск, диапазон страниц и DOI (при наличии), например, DOI: 10.6060/2012.01.01.

#### Ссылки на статьи из иностранных источников:

**1 Фамилия И.О. (англ.), 2 Фамилия И.О. (англ.)** Название статьи (англ.). *Название журнала (англ.)*. Год. Том (Vol.) цифрами, например, Vol. 5, номер (no.) цифрами, например, no. 3. Диапазон страниц через дефис (например, P. 465-472). DOI (при наличии), например, DOI: 10.13655/1.6.1234567).

#### Ссылки на статьи на русском языке [перевод на английский]:

**1 Фамилия, И.О., 2 Фамилия, И.О.** (Год) Название статьи (на англ. языке), *Название журнала (транслитерация)*, Том (Номер) цифрами, диапазон страниц. [1 Familia, I.O., 2 Familia, I.O. (Год) Перевод названия статьи. *Транслитерация названия журнала*, Том (Номер) цифрами, например, 5(3), диапазон страниц, например, pp. 17-23 (in Russian)].

#### Ссылки на монографии и учебники / учебные пособия на иностранном языке:

**1 Фамилия И.О. (англ.), 2 Фамилия И.О. (англ.)** *Название книги (англ.)*. Номер переиздания. Город (англ.): Издательство (англ.). Год. Общее число страниц (например: 372 p.)

#### Ссылки на монографии на русском языке [перевод на английский]:

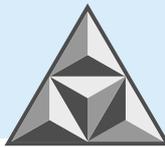
**1 Фамилия, И.О. (англ.) & 2 Фамилия, И.О. (англ.)** (Год) *Название монографии*. Город: Издательство. Общее число страниц (например, 456 с.) [1 Familiya, I.O. & 2 Familiya, I.O. (Год) *Перевод названия монографии на англ. язык*. Город: Издательство (транслитерация) Gorod: Izdatel'stvo. God izdaniya. 456 p. (in Russian)].

#### Ссылки на интернет-ресурсы (рус.):

**Фамилия И.О.** Название материала на сайте [сайт]. Название сайта; 2021 [обновлено 17 октября 2021; процитировано 29 октября 2021]. URL: <http://www.example.ru>

#### Ссылки на интернет-ресурсы (англ.):

**Фамилия, И.О. (англ.)** (Год) *Название материала на сайте (англ.)*. *Название сайта (англ.)*; [обновлено 17 октября 2021; процитировано 29 октября 2021 на англ.] [online]. Available at: <http://www.example.ru>



## Примеры оформления ссылок на литературные источники

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Dvorkin L.I.** The influence of polyfunctional modifier additives on properties of cement-ash finegrained concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. Vol. 93, no. 1. P. 121-133. DOI: 10.18720/MCE.93.10.
2. **Калашников В.И., Мороз М.Н., Нестеров В.Ю., Хвастунов В.Л., Макридин Н.И., Василик П.Г.** Металлоорганические гидрофобизаторы для минерально-шлаковых вяжущих // *Строительные материалы*. 2016. № 10. С. 38-39.
3. **Разговоров П.Б., Горшков В.К.** Технологическое оборудование отрасли: расчеты в масложировых производствах: учеб. пособие. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т. 2009. 48 с.
4. **Киселев А.А.** Реновация территории усадьбы Черелисино. URL: <https://cad.ru/support/bz/projects/3ds-max/renovatsiya-territorii-usadby-cherelisino/?ysclid=lh25z2rtja319315116>

### REFERENCES

1. **Dvorkin, L.I.** (2020) The influence of polyfunctional modifier additives on properties of cement-ash fine-grained concrete, *Magazine of Civil Engineering*, 93(1), pp. 121-133. DOI:10.18720/MCE.93.10
2. **Kalashnikov, V.I., Moroz, M.N., Nesterov, V.Yu., Khvastunov, V.L., Makridin, N.I. & Vasilik, P.G.** (2016) Organometallic hydrophobizers for mineral-slag binders, *Stroitel'nye materialy*, (10), pp. 38-39 (in Russian).
3. **Razgovorov, P.B. & Gorshkov, V.K.** (2009) *Processing equipment of industry: calculations in oil and fat productions*. Ivanovo: Ivan. gos. khim.-tekhnol. un-t (in Russian).
4. **Kiselev, A.A.** *Renovation of the Cherelisino estate territory* [online]. Available at: <https://cad.ru/support/bz/projects/3ds-max/renovatsiya-territorii-usadby-cherelisino/?ysclid=lh25z2rtja319315116> (in Russian).

**УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ  
В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**  
SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION



**ТОМ 4, ВЫПУСК 4, 2023** | VOL. 4, ISSUE 4

