

ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

ИТС

9/2021



Уважаемые коллеги, дорогие друзья!

Примите мои сердечные поздравления и самые добрые пожелания в связи с началом нового учебного года! С особыми чувствами в первый осенний день мы встречаем замечательный, по сути профессиональный, праздник – День знаний. Для каждого из нас 1 сентября – это своеобразная точка отсчета, с которой традиционно связываются новые надежды и ожидания.

2021 год – это Год науки и технологий в России, особый год для Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ) – год 100-летнего юбилея. В конце мая 2021 года на базе нашего университета был сформирован Отраслевой консорциум «Строительство и архитектура», объединивший все российские архитектурно-строительные вузы, профильные научные организации, Российскую академию архитектуры и строительных наук, отраслевые и межотраслевые объединения работодателей. Приглашаем коллег из партнерских организаций также включаться и в эту работу.

В этом году НИУ МГСУ вошел в ежегодный международный рейтинг лучших вузов мира – THE World University Rankings 2022 по версии британского журнала Times Higher Education (THE) на высокой позиции 601-800. Считаю, что это достойная оценка всего коллектива НИУ МГСУ, отражение того, что Россия сильна своей инженерно-строительной школой. По существу, именно самоотверженная работа преподавателей, научных работников и сотрудников нашего университета позволила НИУ МГСУ в 2021 году оказаться в числе лучших вузов России и мира. Следует отметить, что высокие позиции в рейтинге являются важным сигналом для профессионального сообщества, отрасли в целом в отношении качества образования и науки в нашем университете.

Этой осенью состоится знаменательное событие – празднование 100-летия нашего университета. В разное время здесь учились и преподавали крупнейшие мастера архитектуры и градостроительства, ученые мирового уровня в области строительных наук, инженеры, которые формировали облик городов нашей необъятной страны, чьи творения живут в веках, радуя своей красотой потомков. Мы, конечно, должны хранить исторические традиции, приумножать богатое научно-образовательное и творческое наследие, соответствовать высокому уровню многих поколений наших работников и обучающихся.

От имени всего коллектива университета приглашаю выпускников, студентов, сотрудников и всех, чья жизнь связана с многолетней историей МИСИ-МГСУ, принять участие в юбилейных мероприятиях.

Желаю крепкого здоровья, творческой энергии и новых свершений! Уверен, нас ждет интересный, насыщенный разнообразными событиями новый учебный год!

**С уважением,
ректор Национального исследовательского
Московского государственного строительного университета,
академик РААСН, профессор, доктор технических наук**



П. А. АКИМОВ

СОУЧРЕДИТЕЛИ:

Российское общество инженеров строительства, Российская инженерная академия

СОДЕРЖАНИЕ**К 100-ЛЕТИЮ МИСИ–МГСУ**

- Локализация решения краевой задачи для уравнения Пуассона на основе В-сплайнов
Акимов П. А., Мозгалева М. Л., Кайтуков Т. Б. _____ **4**
- Апробация требований к устройству «зеленых» крыш в городской застройке
Теличенко В. И., Бенуж А. А., Мочалов И. В., Богачев А. В. _____ **12**
- Осадка и длительная несущая способность сваи
Тер-Мартirosян З. Г., Тер-Мартirosян А. З., Ермошина Л. Ю. _____ **18**
- Обеспечение огнестойкости воздуховодов систем дымоудаления с огнезащитными покрытиями
Портнов Ф. А., Еремина Т. Ю., Корольченко Д. А. _____ **24**
- Интеграция железнодорожного транспорта в интермодальную транспортную систему города
Власов Д. Н. _____ **31**
- Возможности сочетания водопроницаемости с различными физическими свойствами полимеров
Мацеевич Т. А., Жданова Т. В., Андреев И. Ф., Аскадский А. А. _____ **39**
- Физическое моделирование грузового причала терминала «Утренний»
Шуныко А. С., Шуныко Н. В. _____ **47**
- Формирование средозащитных объектов городской среды для условий жаркого и влажного климата
Ле М. Т., Бакаева Н. В. _____ **52**
- Выбор аварийных ситуаций при расчете на прогрессирующее обрушение промышленного здания
Туснина О. А. _____ **60**
- Нелокальные модели демпфирования в динамических расчетах конструкций из композитных материалов
Сидоров В. Н., Бадина Е. С. _____ **66**

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

- Легкая градирня для тепловой электростанции
Кокоев М. Н., Федоров В. Т. _____ **71**

ВЫСТАВКИ, КОНФЕРЕНЦИИ, ФЕСТИВАЛИ

- Итоги фестиваля «Архитектурное наследие 2021» (*Информация*) _____ **77**

СПОНСОРЫ и ПАРТНЕРЫ

Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы, РААСН, НИУ МГСУ, Комитет Торгово-промышленной палаты РФ по предпринимательству в сфере строительства, Моспроект-2 им. М. В. Посохина, ЦНИИПромзданий, ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Б. В. ГУСЕВ, главный редактор,
доктор технических наук, член-корреспондент РАН
(Москва)

М. И. БАЛЪЗАННИКОВ, доктор технических наук (Самара)

М. И. БОГДАНОВ, кандидат геолого-минералогических наук
(Москва)

Т. БОК, доктор технических наук (Мюнхен, Германия)

М. БОЛТРИК, доктор технических наук (Белосток, Польша)

И. И. ВЕДЯКОВ, доктор технических наук (Москва)

А. А. ВОЛКОВ, доктор технических наук,
член-корреспондент РААСН (Москва)

И. Е. ГОРЯЧЕВ, кандидат технических наук (Москва)

В. В. ГРАНЁВ, доктор технических наук (Москва)

А. Н. ДМИТРИЕВ, доктор технических наук (Москва)

В. Т. ЕРОФЕЕВ, доктор технических наук,
академик РААСН (Саранск)

Б. Т. ЖУМАГУЛОВ, доктор технических наук
(Астана, Казахстан)

О. Н. ЗАЙЦЕВ, доктор технических наук (Симферополь)

М. А. КИОРИНО, доктор технических наук,
академик Туринской академии наук (Турин, Италия)

В. И. КОЛЧУНОВ, доктор технических наук,
академик РААСН (Курск)

Е. В. КОРОЛЁВ, доктор технических наук (Санкт-Петербург)

А. А. КУСАИНОВ, доктор технических наук
(Алматы, Казахстан)

В. В. ЛАРИОНОВ, доктор технических наук (Москва)

В. Е. ЛЕВКЕВИЧ, доктор технических наук (Минск, Беларусь)

С. И. ЛЁВКИН, доктор менеджмента (Москва)

С. Д. МИТЯГИН, доктор архитектуры,
член-корреспондент РААСН (Санкт-Петербург)

В. МЕЩЕРИН, доктор технических наук
(Дрезден, Германия)

В. Л. МОНДРУС, доктор технических наук,
член-корреспондент РААСН (Москва)

А. Я. НАЙЧУК, доктор технических наук
(Брест, Беларусь)

П. П. ОЛЕЙНИК, доктор технических наук (Москва)

М. М. ПОСОХИН, академик Международной академии архитектуры,
академик РААСН (Москва)

О. Г. ПРИМИН, доктор технических наук (Москва)

В. И. РЕСИН, доктор экономических наук,
академик РААСН (Москва)

В. И. ТЕЛИЧЕНКО, доктор технических наук,
академик РААСН (Москва)

В. Р. ФАЛИКМАН, доктор материаловедения
(Москва)

О. И. ФЕДОСЕЕВА, заместитель главного редактора
(Москва)

Журнал включен в Перечень изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук. Журнал входит в базы данных eLibrary.ru, ВИНТИ РАН, Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science, Ulrich's Periodicals Directory, индексируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ). Плата за аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Редакция журнала

127434 Москва,
Дмитровское шоссе, 9, стр. 2, офис 337
☎: 8 (499) 609-02-39
E-mail: pgs@inbox.ru, www: pgs1923.ru

АВТОРЫ ОПУБЛИКОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ НЕСУТ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ЗА ТОЧНОСТЬ ПРИВЕДЕННЫХ ФАКТОВ, ЦИТАТ, СОБСТВЕННЫХ ИМЕН И ПРОЧИХ СВЕДЕНИЙ. РЕДАКЦИЯ МОЖЕТ ПУБЛИКОВАТЬ СТАТЬИ, НЕ РАЗДЕЛЯЯ ТОЧКУ ЗРЕНИЯ АВТОРА. ЗА СОДЕРЖАНИЕ РЕКЛАМНЫХ ОБЪЯВЛЕНИЙ РЕДАКЦИЯ ОТВЕТСТВЕННОСТИ НЕ НЕСЕТ. ПЕРЕПЕЧАТКА МАТЕРИАЛОВ ЖУРНАЛА БЕЗ ПИСЬМЕННОГО СОГЛАСИЯ РЕДАКЦИИ НЕ ДОПУСКАЕТСЯ.

Журнал зарегистрирован в Госкомпечати РФ. Рег. № 01061

Подписано в печать 21.09.2021 г. Бумага мелованная. Формат 60×88 1/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10. Цена 1795 р. Заказ № 380

EDITORIAL BOARD

B. V. GUSEV, Editor-in-Chief,
DSc, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences
(Moscow, Russian Federation)

M. I. BALZANNIKOV, DSc (Samara, Russian Federation)

T. BOCK, Dr.-Ing. (Munich, Germany)

M. I. BOGDANOV, PhD (Moscow, Russian Federation)

M. BOLTRYK, DSc (Bialystok, Poland)

M. A. CHIORINO, DSc, Academician of Turin Academy of Sciences
(Torino, Italy)

A. N. DMITRIEV, DSc (Moscow, Russian Federation)

V. T. EROFEEV, DSc, Academician of the Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences (Saransk, Russian Federation)

V. R. FALIKMAN, Doctor in Materials Science
(Moscow, Russian Federation)

O. I. FEDOSEEVA, Deputy Editor-in-Chief
(Moscow, Russian Federation)

I. E. GORYACHEV, PhD (Moscow, Russian Federation)

V. V. GRANEV, DSc (Moscow, Russian Federation)

V. I. KOLCHUNOV, DSc, Academician of the Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences (Kursk, Russian Federation)

E. V. KOROLEV, DSc (St. Petersburg, Russian Federation)

A. A. KUSSAINOV, DSc (Almaty, Kazakhstan)

V. V. LARIONOV, DSc (Moscow, Russian Federation)

V. E. LEVKEVICH, DSc (Minsk, Belarus)

S. I. LEVKIN, Doctor of management (Moscow, Russian Federation)

V. MECHTCHERINE, Dr.-Ing. (Dresden, Germany)

V. L. MONDRUS, DSc, Corresponding member of the Russian
Academy of Architecture and Construction Sciences (Moscow,
Russian Federation)

S. D. MITYAGIN, DSc, Corresponding member of the Russian
Academy of Architecture and Construction Sciences
(St. Petersburg, Russian Federation)

A. Y. NAYCHUK, DSc (Brest, Belarus)

P. P. OLEJNIK, DSc (Moscow, Russian Federation)

M. M. POSOKHIN, Academician of the International Academy
of Architecture, Academician of the Russian Academy of Architecture
and Construction Sciences (Moscow, Russian Federation)

O. G. PRIMIN, DSc (Moscow, Russian Federation)

V. I. RESIN, DSc, Academician of the Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences
(Moscow, Russian Federation)

V. I. TELICHENKO, DSc, Academician of the Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences
(Moscow, Russian Federation)

I. I. VEDYAKOV, DSc (Moscow, Russian Federation)

A. A. VOLKOV, DSc, Corresponding member of the Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences (Moscow, Russian Federation)

O. N. ZAITSEV, DSc (Simferopol, Russian Federation)

B. T. ZHUMAGULOV, DSc (Astana, Republic of Kazakhstan)

The journal is included into the List of top scientific reviewed journals and publications that publish scientific findings presented in dissertations for PhD and DSc. Bibliographic databases: eLIBRARY, VINITI RAN, Web Science in the form of the Russian Science Citation Index (RSCI), Ulrich's Periodicals Directory as well as indexing in the Russian Science Citation Index (RSCI). Post-graduate students are not charged for manuscript publishing.

Editorial

office 337, 9, Dmitrovsky highway, building 2,
Moscow 127434, Russian Federation
☎: +7 (499) 609-02-39
E-mail: pgs@inbox.ru, www: pgs1923.ru

CO-FOUNDERS:

Russian Society of Civil Construction Engineers, Russian Engineering Academy

CONTENTS**TO THE 100TH ANNIVERSARY OF MISI-MGSU**

| | |
|---|----|
| Localization of Solution of Boundary Problem for Poisson's Equation With the Use of B-Spline Wavelet-Based <i>Akimov P. A., Mozgaleva M. L., Kaytukov T. B.</i> | 4 |
| Approbation of the Requirements for the Construction of "Green" Roofs of Urban Development <i>Telichenko V. I., Benuzh A. A., Mochalov I. V., Bogachev A. V.</i> | 12 |
| Settlement and Long-Term Bearing Capacity of the Pile <i>Ter-Martirosyan Z. G., Ter-Martirosyan A. Z., Ermoshina L. Yu.</i> | 18 |
| Ensuring Fire Resistance of Air Ducts of Smoke Removal Systems With Fire-Proofresistant Coatings <i>Portnov F. A., Eremina T. Yu., Korolchenko D. A.</i> | 24 |
| Integration of Railway Transport into the Intermodal Transport System of the City <i>Vlasov D. N.</i> | 31 |
| Possibilities of Combining Water Permeability With Various Physical Properties of Polymers <i>Matseevich T. A., Zhdanova T. V., Andreev I. F., Askadskii A. A.</i> | 39 |
| Physical Modeling of the Cargo Berth of the Terminal "Utrenny" <i>Shunko A. S., Shunko N. V.</i> | 47 |
| The Formation of Environmental Protection Objects of the Urban Environment for Hot and Humid Climate Conditions <i>Le M. T., Bakaeva N. V.</i> | 52 |
| The Choice of Emergency Situations When Calculating the Progressive Collapse of an Industrial Building <i>Tusnina O. A.</i> | 60 |
| Non-Local Damping Models in Dynamic Calculations of Structures Made of Composite Materials <i>Sidorov V. N., Badina E. S.</i> | 66 |

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND FACILITIES

| | |
|--|----|
| Light Weight Cooling Tower for Thermal Power Plant <i>Kokoev M. N., Fedorov V. T.</i> | 71 |
|--|----|

EXHIBITIONS, CONFERENCES, FESTIVALS

| | |
|--|----|
| Results of the "Architectural Heritage 2021" Festival (<i>Information</i>) | 77 |
|--|----|

SPONSORS and PARTNERS

Complex of Urban Development Policy and Construction of Moscow, RAACS, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Committee of the Chamber of Commerce and Industry of the Russian Federation for Entrepreneurship in the Sphere of Construction, Mosproject-2 named after M. V. Posokhin, TSNIPromzdany, JSC Research Center of Construction, Research Institute of Building Constructions named after V. A. Koucherenko

Локализация решения краевой задачи для уравнения Пуассона на основе В-сплайнов

Павел Алексеевич АКИМОВ, академик РААСН, доктор технических наук, профессор, e-mail: akimovpa@mgsu.ru

Марина Леонидовна МОЗГАЛЕВА, доктор технических наук, профессор, e-mail: marina.mozgaleva@gmail.com

Таймураз Батразович КАЙТУКОВ, кандидат технических наук, доцент, советник РААСН, e-mail: kaytukovtb@mgsu.ru

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. Рассматривается известная краевая задача для уравнения Пуассона. Для ее решения применяется одна из возможных вейвлет-реализаций дискретно-континуального метода конечных элементов, основанная на использовании В-сплайнов. Следует уточнить, что объектом исследования являются конструкции с постоянными физико-математическими характеристиками по одному из направлений (далее это так называемое основное направление). В статье приводится континуальная постановка соответствующей задачи с выделением основного направления – имеем дифференциальное уравнение с операторными коэффициентами с соответствующими краевыми условиями. Рассматриваются некоторые вопросы, связанные с построением нормализованных базисных функций В-сплайна, приводится дискретно-континуальная постановка задачи, сформированная с использованием техники конечно-элементной аппроксимации. Здесь соответственно имеем результирующую систему обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. В заключительной части статьи описан пример численной реализации предложенного подхода, а также пример расчета.

Ключевые слова: дискретно-континуальный метод конечных элементов, вейвлет-реализация, В-сплайн, краевая задача, уравнение Пуассона, верификация.

LOCALIZATION OF SOLUTION OF BOUNDARY PROBLEM FOR POISSON'S EQUATION WITH THE USE OF B-SPLINE WAVELET-BASED

Pavel A. AKIMOV, e-mail: akimovpa@mgsu.ru

Marina L. MOZGALEVA, e-mail: marina.mozgaleva@gmail.com

Taymuraz B. KAYTUKOV, e-mail: kaytukovtb@mgsu.ru

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

Abstract. The well-known boundary problem for Poisson's equation is under consideration. B-spline wavelet-based discrete continual finite element method is used for its solution. It should be mentioned, in particular, that target of research is corresponding structure with constant physical and geometrical parameters along one direction (so-called "basic direction"). Continual formulation of the problem within considering approach (differential equation with operator coefficients and considering boundary conditions) is given. Further, some issues related to the construction of normalized basis functions of a B-spline are considered, a discrete-continual formulation of the problem is presented (with the use of the technique of finite element approximation). Resultant system of ordinary differential equations with constant coefficients is given. The final part of the paper describes an example of the numerical implementation of the proposed approach, as well as an example of analysis (numerical example).

Key words: discrete-continual finite element method, wavelet-based version, B-spline, boundary problem Poisson's equation, verification.

Введение

К уравнению Пуассона и другим подобным уравнениям эллиптического типа сводятся различные задачи механики сплошных сред [1–6]. Как известно, краевыми задачами с уравнением Пуассона описываются, в частности, стационарное температурное поле, напряженное состояние при кручении стержня, прогиб мембраны и т. д. Кроме того, оператор соответствующей задачи (оператор Лапласа) входит составной частью и в другие задачи, определяющие состояние конструкций при стационарных и нестационарных воздействиях. С математической точки зрения он является простейшим каче-

ственным аналогом других задач и эквивалентным оператором в итерационных процессах [7].

Во многих численных моделях на различных шагах по времени возникает необходимость в численном решении одной или нескольких краевых задач для уравнения Пуассона, причем в некоторых приложениях число шагов по времени в ходе одного просчета модели может иметь порядок от тысяч до миллионов и более [8]. В этой связи тематика настоящей статьи, посвященной полуаналитическому методу расчета соответствующих конструкций с постоянными физико-геометрическими характеристиками по одному из направлений (так называемому

основному направлению) [7, 9, 10], представляется весьма актуальной. Описываемый здесь метод является полуаналитическим в том смысле, что по основному направлению конструкции задача остается континуальной и строится ее точное аналитическое решение, тогда как по другому, неосновному, направлению выполняется численная аппроксимация. Цель предлагаемой работы – разработка алгоритма локализации решения на основе применения В-сплайнов различной степени для численной аппроксимации неизвестных функций на элементах разбиения по дискретному (неосновному) направлению. Данная статья продолжает серию публикаций, посвященных исследованию и развитию различных вейвлет-реализаций дискретно-континуального метода конечных элементов.

В теории краевых задач для уравнений Пуассона и Лапласа обычно применяют несколько классических, хорошо апробированных методов решения [1, 11–13], к которым, в частности, можно отнести:

- метод разделения переменных, или метод Фурье;
- метод функций Грина;
- метод сведения краевых задач для уравнения Лапласа к интегральным уравнениям с применением теории потенциала.

Широко используемые, наряду с перечисленными аналитическими методами, численные методы решения уравнения Пуассона, в том числе метод конечных элементов, метод граничных элементов, метод конечных разностей, вариационно-разностный метод, метод конечных объемов, метод точечных источников поля, метод быстрого преобразования Фурье с использованием параллельных вычислений (с реализацией на ядрах центрального процессора, на графических процессорах (GPU) и др.), кратко описаны, например в [8, 14, 15].

1. Континуальная постановка задачи

Постановка задачи имеет вид:

$$Lu = F; \quad 0 \leq x_1 \leq l_1; \quad 0 \leq x_2 \leq l_2; \quad (1.1)$$

$$lu|_{\Gamma} = g, \quad (1.2)$$

где L – оператор задачи на исходной области,

$$L = -\partial_1^2 - \partial_2^2; \quad \partial_1 = \partial/\partial x_1; \quad \partial_2 = \partial/\partial x_2; \quad (1.3)$$

l – оператор граничных (краевых) условий.

Пусть имеем постоянство параметров задачи по направлению x_2 (основное направление). Введем обозначения:

$$v = \partial_2 u = u'; \quad v' = \partial_2 v. \quad (1.4)$$

Тогда уравнение (1.1) преобразуется к виду:

$$L_{uu}u - L_{vv}v' = F \quad \text{или} \quad L_{vv}v' = L_{uu}u - F, \quad (1.5)$$

$$\text{где } L_{uu} = -\partial_1^2 = \partial_1^* \partial_1; \quad L_{vv} = 1. \quad (1.6)$$

Зависимости (1.4) и (1.5) позволяют привести (1.1) к системе дифференциальных уравнений с операторными коэффициентами:

$$\bar{U}' = A\bar{U} + \bar{F}, \quad (1.7)$$

$$\text{где } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ L_{vv}^{-1}L_{uu} & 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ -L_{vv}^{-1}F \end{bmatrix}; \quad \bar{U} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}. \quad (1.8)$$

Система уравнений (1.7) дополняется граничными условиями, которые задаются в сечениях с координатами $x_2^1 = 0$, $x_2^2 = l_2$.

2. Некоторые вопросы построения нормализованных базисных функций В-сплайна

Построение базисных функций В-сплайна [16, 17] определяется рекурсивными формулами Кокса-де Бур:

$$k = 1: \quad \varphi_{i,1}(t) = \begin{cases} 1, & x_i \leq t < x_{i+1} \\ 0, & t < x_i \vee t \geq x_{i+1} \end{cases}; \quad (2.1)$$

$$k \geq 2: \quad \varphi_{i,k}(t) = \frac{(t - x_i)\varphi_{i,k-1}(t)}{x_{i+k-1} - x_i} + \frac{(x_{i+k} - t)\varphi_{i+1,k-1}(t)}{x_{i+k} - x_{i+1}}. \quad (2.2)$$

Будем рассматривать такое построение для $x_i = i$, где i – целые числа. Заметим, что $\varphi_{i,k}(t) = \varphi_{0,k}(t - i)$, поэтому рекурсивные формулы (2.1) и (2.2) можно представить в виде:

$$k = 1: \quad \varphi_{0,1}(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < 1 \\ 0, & t < 0 \vee t \geq 1 \end{cases}; \quad (2.3)$$

$$k \geq 2: \quad \varphi_{0,k}(t) = \frac{1}{k-1} [t\varphi_{0,k-1}(t) + (k-t)\varphi_{0,k-1}(t-1)]. \quad (2.4)$$

Функцию $\varphi_{0,1}(t)$ можно представить в виде:

$$\varphi_{0,1}(t) = \frac{1}{2} [\text{sign}(t) - \text{sign}(t-1)]. \quad (2.5)$$

Обозначим Δ_1 – оператор первой разности, тогда

$$\varphi_{0,1}(t) = -\frac{1}{2} \Delta_1 \text{sign}(t). \quad (2.6)$$

Подставив формулу (2.5) в (2.4) для определения $\varphi_{0,2}(t)$, будем иметь:

$$\begin{aligned} \varphi_{0,2}(t) &= 1 \cdot [t\varphi_{0,1}(t) + (2-t)\varphi_{0,1}(t-1)] = \\ &= \frac{1}{2} \{t[\text{sign}(t) - \text{sign}(t-1)] + (2-t)[\text{sign}(t-1) - \\ &- \text{sign}(t-2)]\} = \frac{1}{2} [t\text{sign}(t) - 2(t-1)\text{sign}(t-1) + \\ &+ (t-2)\text{sign}(t-2)] = \frac{1}{2} [|t| - 2|t-1| + |t-2|]. \end{aligned}$$

Обозначим Δ_2 – оператор второй разности, тогда

$$\varphi_{0,2}(t) = \frac{1}{2}[|t| - 2|t - 1| + |t - 2|] = \frac{1}{2} \Delta_2 |t - 1|. \quad (2.7)$$

Определим функцию $\varphi_{0,3}(t)$:

$$\varphi_{0,3}(t) = \frac{1}{2}[t\varphi_{0,2}(t) + (3 - t)\varphi_{0,2}(t - 1)].$$

Опуская промежуточные выкладки, получим:

$$\begin{aligned} \varphi_{0,3}(t) = \frac{1}{4}[t \cdot |t| - 3(t - 1)|t - 1| + 3(t - 2)|t - 2| - \\ - (t - 3)|t - 3|] = -\frac{1}{2!} \frac{1}{2} \Delta_1 \Delta_2 [(t - 1)|t - 1|. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Исходя из формул (2.8) и (2.4), определим функцию $\varphi_{0,4}(t)$:

$$\varphi_{0,4}(t) = \frac{1}{3}[t\varphi_{0,3}(t) + (4 - t)\varphi_{0,3}(t - 1)].$$

Опуская промежуточные выкладки, получим:

$$\begin{aligned} \varphi_{0,4}(t) = \frac{1}{2 \cdot 3} \frac{1}{2} [t^2 |t| - 4(t - 1)^2 |t - 1| + \\ + 6(t - 2)^2 |t - 2| - 4(t - 3)^2 |t - 3| + (t - 4)^2 |t - 4|] = \\ = \frac{1}{3!} \frac{1}{2} (\Delta_2)^2 [(t - 2)^2 |t - 2|]. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Можно проверить, что для k четных ($k = 2m$) имеем:

$$\varphi_{0,k}(t) = \frac{1}{(2m - 1)!} \frac{1}{2} (\Delta_2)^m [(t - m)^{2m-2} |t - m|], \quad (2.10)$$

а для k нечетных ($k = 2m + 1$):

$$\varphi_{0,k}(t) = -\frac{1}{(2m)!} \frac{1}{2} \Delta_1 (\Delta_2)^m [(t - m)^{2m-1} |t - m|]. \quad (2.11)$$

Отметим, что $\varphi_{0,k}(t)$ является полиномом степени $k - 1$ с ограниченным носителем и, как следует из разностного оператора, этот носитель равен интервалу $[0, k]$. Кроме того, отметим следующее свойство базисных функций В-сплайна:

$$\sum_i \varphi_{0,k}(t - 1) \equiv 1 \text{ для любого значения } t. \quad (2.12)$$

3. Конечно-элементная аппроксимация

Дискретная составляющая численного решения представлена направлением вдоль оси x_1 . Восполнение на элементе (отрезке) для всех компонентов вектор-функции \bar{U} (см. (1.8)) одинаковое. Поэтому для простоты изложения при последующих построениях обозначим $x = x_1$, $l = l_1$ и y – компонента вектор-функции \bar{U} . Разобьем отрезок $(0, l)$ на N_e частей (элементов), $h_e = l/N_e$ – длина элемента. Каждый элемент разобьем также на N_k частей, при этом на элементах локализации N_k имеет

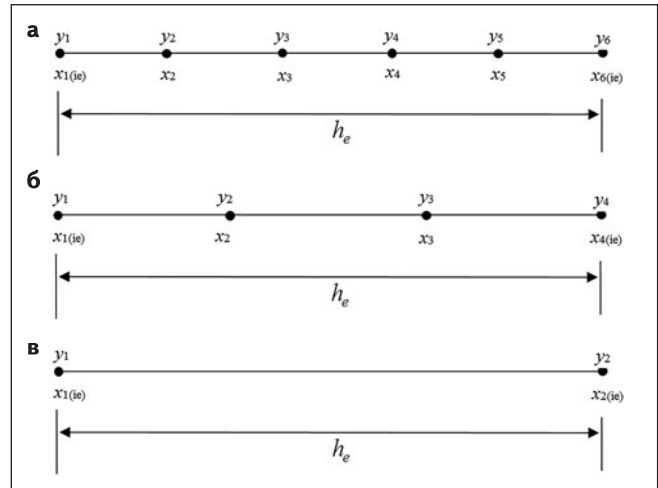


Рис. 3.1. Примеры конечно-элементной дискретизации при $N_k = 5$ (а) и при $N_k = 3$ (б), а также конечно-элементная разбивка при $N_k = 1$ (в)

большее значение, чем на остальных элементах. Пусть, например, на элементах локализации задано $N_k = 5$ (рис. 3.1а). Обозначим: i_e – номер элемента; $N_p = N_k + 1 = 6$ – количество узлов на элементе; $x_1(i_e)$ и $x_6(i_e)$ – координаты начальной и конечной точек i_e -го элемента соответственно.

Количество неизвестных на элементе при такой разбивке равно

$$N_{ie} = N_p = 6. \quad (3.1)$$

Также можно на элементах локализации принять несколько меньшее значение N_k , например, $N_k = 3$ (рис. 3.1б), $N_p = N_k + 1 = 4$. Тогда количество неизвестных на элементе при такой разбивке ($x_1(i_e)$ и $x_4(i_e)$ – координаты начальной и конечной точек i_e -го элемента соответственно) равно:

$$N_{ie} = N_p = 4. \quad (3.2)$$

Пусть на оставшихся элементах $N_k = 1$ (рис. 3.1в), $N_p = N_k + 1 = 2$. Тогда количество неизвестных на элементе при такой разбивке ($x_1(i_e)$ и $x_2(i_e)$ – координаты начальной и конечной точек i_e -го элемента соответственно) равно:

$$N_{ie} = N_p = 2. \quad (3.3)$$

Переходим к локальным координатам:

$$t = (x - x_{1(i_e)})/h_e; \quad x_{1(i_e)} \leq x \leq x_{N_p(i_e)}; \quad (3.4)$$

$$0 \leq t \leq 1.$$

При этом имеют место следующие соотношения:

$$x = x_i \Rightarrow t_i = (x_i - x_{1(i_e)})/h_e, \quad i = 1, \dots, N_p; \quad (3.5)$$

$$\frac{d^p}{dx^p} = \frac{1}{h_e^p} \frac{d^p}{dt^p}; \quad dx = h_e dt.$$

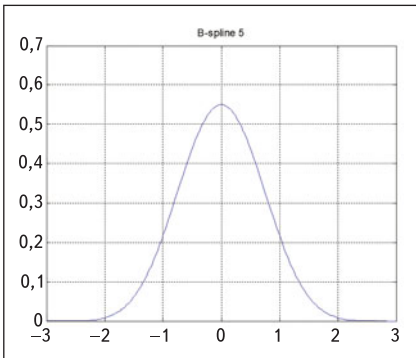


Рис. 3.2. В-сплайн степени 5
 $\varphi(t) = \varphi_{0,6}(t+3)$

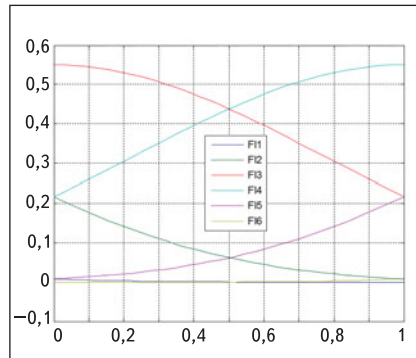


Рис. 3.3. Базисные функции на единичном отрезке $\varphi_k(t)$, $k = 1, 2, \dots, 6$

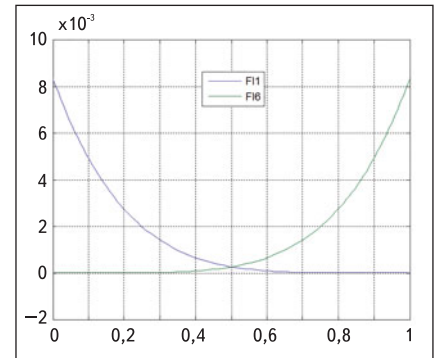


Рис. 3.4. Базисные функции $\varphi_1(t)$ и $\varphi_6(t)$

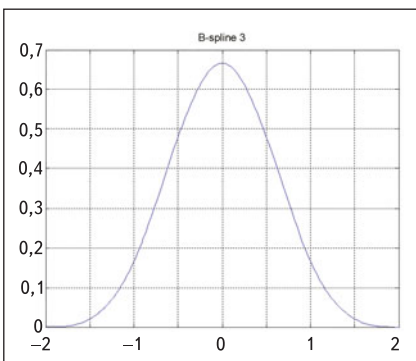


Рис. 3.5. В-сплайн степени 3
 $\varphi(t) = \varphi_{0,4}(t+2)$

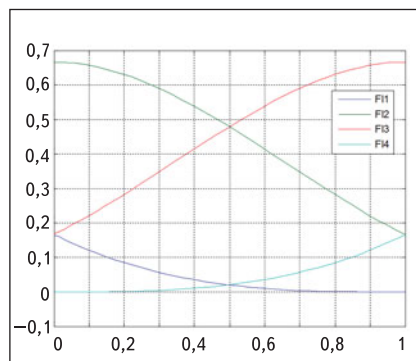


Рис. 3.6. Базисные функции на единичном отрезке $\varphi_k(t)$, $k = 1, 2, 3, 4$

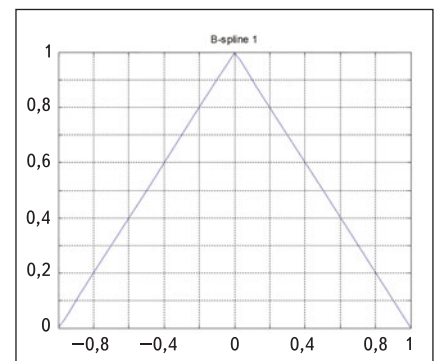


Рис. 3.7. В-сплайн степени 1
 $\varphi(t) = \varphi_{0,2}(t+1)$

В случае, когда количество неизвестных на элементе $N_{ie} = 6$, для представления неизвестных функций воспользуемся В-сплайном степени 5. Обозначим $\varphi(t) = \varphi_{0,6}(t+3)$:

$$\varphi(t) = \frac{1}{5!} \frac{1}{2} (\Delta_2)^3 (t^4|t) = \frac{1}{5! \cdot 2} [(t+3)^4|t+3| - 6(t+2)^4|t+2| + 15(t+1)^4|t+1| - 20t^4|t| + 15(t-1)^4|t-1| - 6(t-2)^4|t-2| + (t-3)^4|t-3|]. \quad (3.6)$$

Эта функция является В-сплайном, симметричным относительно $t = 0$, и ее носитель определен интервалом $[-3, 3]$ (рис. 3.2).

В качестве базисных функций на единичном отрезке принимаем следующие шесть функций (рис. 3.3 и 3.4):

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) &= \varphi(t+2); & \varphi_2(t) &= \varphi(t+1); & (3.7) \\ \varphi_3(t) &= \varphi(t); & \varphi_4(t) &= \varphi(t-1); & \varphi_5(t) &= \varphi(t-2); \\ \varphi_6(t) &= \varphi(t-3); & 0 &\leq t \leq 1. \end{aligned}$$

Когда количество неизвестных на элементе $N_{ie} = 4$, для представления неизвестных функций воспользуемся В-сплайном степени 3. Обозначим $\varphi(t) = \varphi_{0,4}(t+2)$:

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \frac{1}{3!} \frac{1}{2} (\Delta_2)^2 (t^2|t) = \frac{1}{3! \cdot 2} [(t+2)^2|t+2| - 4(t+1)^2|t+1| + 6t^2|t| - 4(t-1)^2|t-1| + (t-2)^2|t-2|]. \quad (3.8) \end{aligned}$$

Эта функция является В-сплайном, симметричным относительно $t = 0$, и ее носитель определен интервалом $[-2, 2]$ (рис. 3.5).

В качестве базисных функций на единичном отрезке принимаем следующие четыре функции (рис. 3.6):

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) &= \varphi(t+1); & \varphi_2(t) &= \varphi(t); & (3.9) \\ \varphi_3(t) &= \varphi(t-1); & \varphi_4(t) &= \varphi(t-2); & 0 \leq t \leq 1. \end{aligned}$$

Когда количество неизвестных на элементе $N_{ie} = 2$, для представления неизвестных функций воспользуемся В-сплайном степени 1. Обозначим $\varphi(t) = \varphi_{0,2}(t+1)$:

$$\varphi(t) = \frac{1}{2} \Delta_2 |t| = \frac{1}{2} [|t+1| - 2|t| + |t-1|]. \quad (3.10)$$

Эта функция является В-сплайном, симметричным относительно $t = 0$, и ее носитель определен интервалом $[-1, 1]$ (рис. 3.7).

В качестве базисных функций на единичном от-

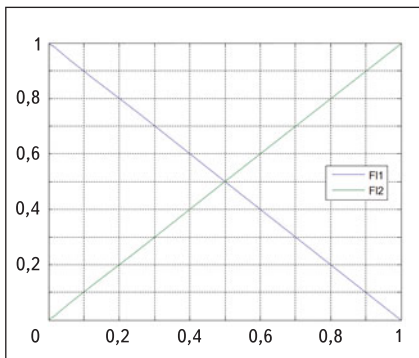


Рис. 3.8. Базисные функции на единичном отрезке $\varphi_k(t)$, $k = 1, 2$

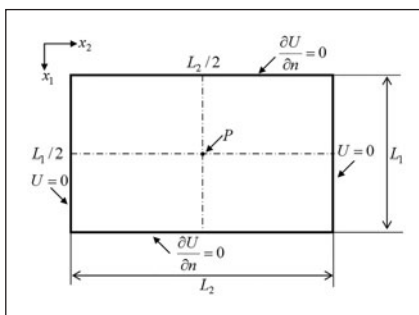


Рис. 4.1. К постановке задачи

резке принимаем следующие две функции (рис. 3.8):

$$\varphi_1(t) = \varphi(t); \quad \varphi_2(t) = \varphi(t-1); \quad 0 \leq t \leq 1. \quad (3.11)$$

Представим неизвестную функцию $y(x)$ на элементе i_e в виде

$$y(x) = w(t) = \sum_{k=1}^{N_{ie}} \alpha_k \varphi_k(t); \quad (3.12)$$

$$x_{1(i_e)} \leq x \leq x_{N_p(i_e)}; \quad 0 \leq t \leq 1.$$

Для построения локальных матриц жесткости, соответствующих операторам L_{uu} и L_{vv} (см. (1.6)), рассмотрим билинейные формы с учетом соотношений (3.5):

$$B_{uu}(y, z) = \langle L_{uu}y, z \rangle = - \int_{x_{1(i_e)}}^{x_{N_p(i_e)}} \frac{d^2y}{dx^2} z dx = \quad (3.13)$$

$$= \int_{x_{1(i_e)}}^{x_{N_p(i_e)}} \frac{dy}{dx} \frac{dz}{dx} dx = \frac{1}{h_e} \int_0^1 \frac{dw}{dt} \frac{dq}{dt} dt = B_{uu}(w, q);$$

$$B_{vv}(y, z) = \langle L_{vv}y, z \rangle = \quad (3.14)$$

$$= \int_{x_{1(i_e)}}^{x_{N_p(i_e)}} yz dx = h_e \int_0^1 wq dt = B_{vv}(w, q)$$

на функциях вида (3.12):

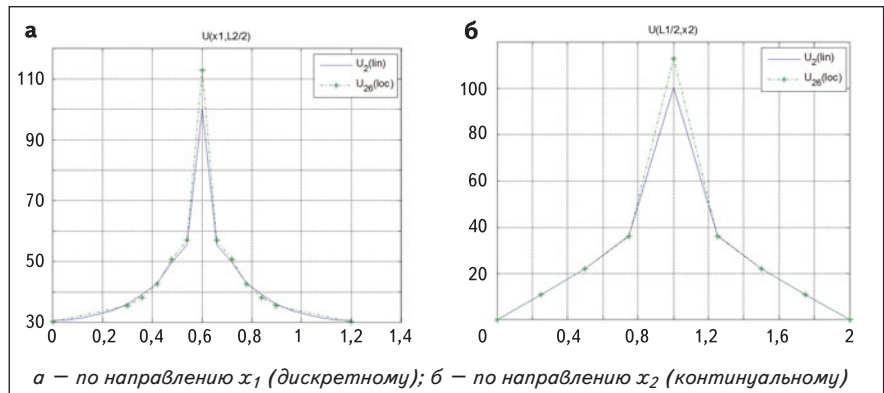


Рис. 4.2. Сопоставление результатов счета в срединных сечениях
а – по направлению x_1 (дискретному); б – по направлению x_2 (континуальному)

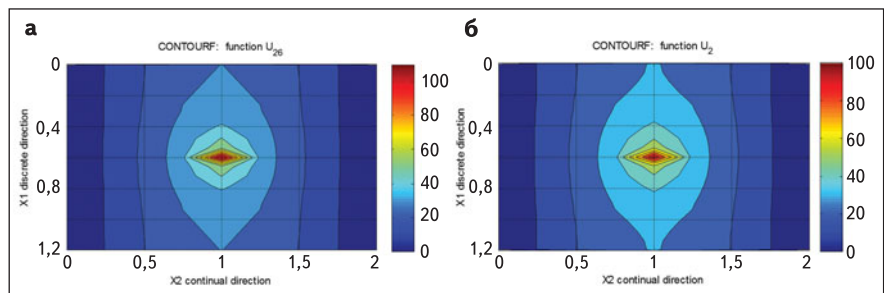


Рис. 4.3. Решения с использованием локализации (а) и с использованием стандартного (линейного) представления функции на элементе (б)

$$y(x) = w(t) = \sum_{k=1}^{N_{ie}} \alpha_k \varphi_k(t); \quad (3.15)$$

$$z(x) = q(t) = \sum_{k=1}^{N_{ie}} \beta_k \varphi_k(t); \quad x_{1(i_e)} \leq x \leq x_{N_p(i_e)};$$

$$0 \leq t \leq 1.$$

Подставим (3.15) последовательно в (3.13) и (3.14):

$$B_{uu}(w, q) = \frac{1}{h_e} \int_0^1 \frac{dw}{dt} \frac{dq}{dt} dt = \quad (3.16)$$

$$= \frac{1}{h_e} \sum_{i=1}^{N_{ie}} \sum_{j=1}^{N_{ie}} \alpha_i \beta_j \int_0^1 \varphi'_i(t) \varphi'_j(t) dt = \frac{1}{h_e} (K_{\alpha\beta}^{uu} \bar{\alpha}, \bar{\beta}),$$

$$\text{где } K_{\alpha\beta}^{uu}(i, j) = \int_0^1 \varphi'_i(t) \varphi'_j(t) dt, \quad \varphi' = \frac{d\varphi}{dt}; \quad (3.17)$$

$$B_{vv}(w, q) = h_e \int_0^1 wq dt = \quad (3.18)$$

$$= h_e \sum_{i=1}^{N_{ie}} \sum_{j=1}^{N_{ie}} \alpha_i \beta_j \int_0^1 \varphi_i(t) \varphi_j(t) dt = h_e (K_{\alpha\beta}^{vv} \bar{\alpha}, \bar{\beta}),$$

$$\text{где } K_{\alpha\beta}^{vv}(i, j) = \int_0^1 \varphi_i(t) \varphi_j(t) dt. \quad (3.19)$$

Определим параметры α_k через узловые неизвестные на элементе:

$$y_i = w(t_i) = \sum_{k=1}^{N_p} \alpha_k \varphi_k(t_i); \quad (3.20)$$

$$t_i = (x - x_{l(i_e)})/h_e, \quad i = 1, \dots, N_p.$$

В случае $N_p = 6$ имеем:

$$\bar{y}^{ie} = T_6 \bar{\alpha}, \quad (3.21)$$

$$\text{где } \bar{y}^{ie} = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4 \ y_5 \ y_6]^T; \quad \bar{\alpha} = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3 \ \alpha_4 \ \alpha_5 \ \alpha_6]^T; \quad (3.22)$$

$$T_6 = \begin{bmatrix} \varphi_1(0) & \varphi_2(0) & \varphi_3(0) & \varphi_4(0) & \varphi_5(0) & \varphi_6(0) \\ \varphi_1(0,2) & \varphi_2(0,2) & \varphi_3(0,2) & \varphi_4(0,2) & \varphi_5(0,2) & \varphi_6(0,2) \\ \varphi_1(0,4) & \varphi_2(0,4) & \varphi_3(0,4) & \varphi_4(0,4) & \varphi_5(0,4) & \varphi_6(0,4) \\ \varphi_1(0,6) & \varphi_2(0,6) & \varphi_3(0,6) & \varphi_4(0,6) & \varphi_5(0,6) & \varphi_6(0,6) \\ \varphi_1(0,8) & \varphi_2(0,8) & \varphi_3(0,8) & \varphi_4(0,8) & \varphi_5(0,8) & \varphi_6(0,8) \\ \varphi_1(1) & \varphi_2(1) & \varphi_3(1) & \varphi_4(1) & \varphi_5(1) & \varphi_6(1) \end{bmatrix}. \quad (3.23)$$

В случае $N_p = 4$ имеем:

$$\bar{y}^{ie} = T_4 \bar{\alpha}, \quad (3.24)$$

$$\text{где } \bar{y}^{ie} = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4]^T; \quad \bar{\alpha} = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3 \ \alpha_4]^T; \quad (3.25)$$

$$T_4 = \begin{bmatrix} \varphi_1(0) & \varphi_2(0) & \varphi_3(0) & \varphi_4(0) \\ \varphi_1(1/3) & \varphi_2(1/3) & \varphi_3(1/3) & \varphi_4(1/3) \\ \varphi_1(2/3) & \varphi_2(2/3) & \varphi_3(2/3) & \varphi_4(2/3) \\ \varphi_1(1) & \varphi_2(1) & \varphi_3(1) & \varphi_4(1) \end{bmatrix}. \quad (3.26)$$

В случае $N_p = 2$ имеем:

$$\bar{y}^{ie} = T_2 \bar{\alpha}, \quad (3.27)$$

$$\text{где } \bar{y}^{ie} = [y_1 \ y_2]^T; \quad \bar{\alpha} = [\alpha_1 \ \alpha_2]^T; \quad T_2 = \begin{bmatrix} \varphi_1(0) & \varphi_2(0) \\ \varphi_1(1) & \varphi_2(1) \end{bmatrix}. \quad (3.28)$$

Аналогично получим

$$\bar{z}^{ie} = T_{N_p} \bar{\beta} \quad (3.29)$$

для $N_p = 6, N_p = 4, N_p = 2$.

Из (3.21) и (3.29) следует, что

$$\bar{\alpha} = T_{N_p}^{-1} \bar{y}^{ie}; \quad \bar{\beta} = T_{N_p}^{-1} \bar{z}^{ie}, \quad (3.30)$$

$$\text{где } T_{N_p} = \{T_{ij}\}_{i,j=1,\dots,N_p}; \quad T_{ij} = \varphi_j(t_i). \quad (3.31)$$

В общем случае имеет место следующая цепочка равенств:

$$\begin{aligned} (K_{\alpha\beta} \bar{\alpha}, \bar{\beta}) &= (K_{\alpha\beta} T_{N_p}^{-1} \bar{y}^{ie}, T_{N_p}^{-1} \bar{z}^{ie}) = \\ &= ((T_{N_p}^{-1})^T K_{\alpha\beta} T_{N_p}^{-1} \bar{y}^{ie}, \bar{z}^{ie}). \end{aligned} \quad (3.32)$$

Таким образом, подставляя (3.30) в (3.16) и в (3.18), получим локальные матрицы жесткости K_{uu}^{ie} и K_{vv}^{ie} , соответствующие операторам L_{uu} и L_{vv} .

4. Пример расчета

В качестве примера рассмотрим краевую задачу,

проиллюстрированную на *рис. 4.1*. Геометрические параметры: $L_1 = 1,2$; $L_2 = 2$. Параметр внешней нагрузки: $P = 100$.

Рассмотрим вначале расчет с учетом локализации. Зададим $N_e = 4$ – количество элементов. Длина элемента:

$$h_e = l_1/N_e = 1,2/4 = 0,3.$$

Определим локализацию решения в зоне нагрузки.

Элементы 1 и 4: $N_k = 1$ – сплайн первого порядка; $h_1 = h_4 = 0,3/1 = 0,3$ – шаг между узлами на элементах 1 и 4.

Элементы 2 и 3: $N_k = 5$ – сплайн пятого порядка; $h_2 = h_3 = 0,3/5 = 0,06$ – шаг между узлами на элементах 2 и 4.

Суммарное количество узлов по всем элементам составляет:

$$N_x = 2 \cdot 1 + 2 \cdot 5 + 1 = 13.$$

Общее количество узловых неизвестных

$$N_U = 2N_x = 2 \cdot 13 = 26.$$

Рассмотрим теперь расчет без учета локализации. В этом случае будем рассматривать только стандартное линейное восполнение. При этом длина элемента принимается равной минимальному шагу между узлами, т. е. $h_e = 0,06$.

Следовательно, количество элементов $N_e = 1,2/0,06 = 20$ и общее количество узлов $N_x = 21$. В этом случае общее количество узловых неизвестных

$$N_U = 2N_x = 2 \cdot 21 = 42.$$

Графическое сопоставление результатов счета представлено на *рис. 4.2 и 4.3*, при этом обозначено: U26(loc) – узловые значения, полученные с учетом локализации; U2(lin) – то же, без учета локализации.

Как видно из приведенных графических сопоставлений полученных результатов, использование в зоне локализации сплайнов более высокого порядка дает более точный результат, при этом существенно сокращается общее количество неизвестных в разрешающей системе линейных алгебраических уравнений.

Вывод

В настоящей статье предложена одна из возможных вейвлет-реализаций дискретно-континуального метода конечных элементов с использованием В-сплайнов. Данный подход был применен для построения численного решения краевой задачи для уравнения Пуассона.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М. : Наука, 2004. 798 с.
2. Ивлев Д. Д. Механика пластических сред. Т. 1. Теория идеальной пластичности. М. : Физматлит, 2001. 445 с.
3. Ивлев Д. Д. Механика пластических сред. Т. 2. Общие вопросы. Жесткопластическое и упругопластическое состояние тел. Упрочнение. Деформационные теории. Сложные среды. М. : Физматлит, 2002. 448 с.
4. Ивлев Д. Д., Ершов Л. В. Метод возмущений в теории упругопластического тела. М. : Наука, 1978. 208 с.
5. Лурье А. И. Теория упругости. М. : Наука, 1970. 939 с.
6. Александров В. М. Задачи механики сплошных сред со смешанными граничными условиями. М. : Наука, 1986. 329 с.
7. Золотов А. Б., Акимов П. А., Мозгалева М. Л. Многоуровневые дискретные и дискретно-континуальные реализации вариационно-разностного метода. М. : АСВ, 2013. 416 с.
8. Мингалев О. В., Мельник М. Н. Численное решение краевых задач для уравнения Пуассона методом быстрого преобразования Фурье с использованием параллельных вычислений // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. № 5-4(9). С. 165–182.
9. Akimov P. A., Belostotskiy A. M., Mozgaleva M. L., Mojtaba Aslami, Negrozov O. A. Correct multilevel discrete-continual finite element method of structural analysis [Корректный многоуровневый дискретно-континуальный метод конечных элементов расчета строительных конструкций] // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1040. Pp. 664–669.
10. Akimov P. A., Sidorov V. N. Correct method of analytical solution of multipoint boundary problems of structural analysis for systems of ordinary differential equations with piecewise constant coefficients [Корректный метод аналитического решения многоочечной краевой задачи расчета строительных конструкций для системы обыкновенных дифференциальных уравнений с кусочно-постоянными коэффициентами] // Advanced Materials Research. 2011. Vol. 250–253. Pp. 3652–3655.
11. Шарфанец Б. П., Шарфанец Е. Б. О выборе методов решения уравнения Пуассона в общем случае распределения объемной плотности заряда и о постановке краевых условий в электрокинетических задачах (обзор) // Научное приборостроение. 2015. Т. 25. № 1. С. 65–75.
12. Владимиров В. С. Уравнения математической физики. М. : Наука, 1981. 512 с.
13. Кошляков Н. С., Глинер Э. Б., Смирнов М. М. Уравнения в частных производных математической физики. М. : Высшая школа, 1970. 712 с.
14. Ворожцов Е. В., Шапеев В. П. Численное решение уравнения Пуассона в полярных координатах методом коллокаций и наименьших невязок // Моделирование и анализ информационных систем. 2015. Т. 22. № 5. С. 648–664.
15. Князев С. Ю., Щербакова Е. Е., Енгибарян А. А. Численное решение краевых задач для уравнения Пуассона методом точечных источников поля // Вестник ДЛГТУ. 2014. Т. 15. № 2(77). С. 15–20.
16. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 464 с.
17. Чуи К. Введение в вейвлеты. М. : Мир, 2001. 412 с.

R E F E R E N C E S

1. Tihonov A. N., Samarskiy A. A. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 798 p. (In Russian).
2. Ivlev D. D. *Mekhanika plasticheskikh sred* [Mechanics of plastic media]. Vol. 1. *Teoriya ideal'noy plastichnosti* [The theory of ideal plasticity]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 445 p. (In Russian).
3. Ivlev D. D. *Mekhanika plasticheskikh sred* [Mechanics of plastic media]. Vol. 2. *Obshchie voprosy. Zhestkoplasticheskoe i uprugoplasticheskoe sostoyanie tel. Uprochnenie. Deformatsionnye teorii. Slozhnye sredy* [General questions. Rigid-plastic and elastic-plastic state of bodies. Hardening. Deformation theories. Complex environments]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 448 p. (In Russian).
4. Ivlev D. D., Ershov L. V. *Metod vozmushchenij v teorii uprugoplasticheskogo tela* [The perturbation method in the theory of an elastic-plastic body]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 208 p. (In Russian).
5. Lur'e A. I. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 939 p. (In Russian).
6. Aleksandrov V. M. *Zadachi mekhaniki sploshnykh sred so smeshannymi granichnymi usloviyami* [Problems of continuum mechanics with mixed boundary conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 329 p. (In Russian).
7. Zolotov A. B., Akimov P. A., Mozgaleva M. L. *Mnogourovnevye diskretnye i diskretno-kontinual'nye realizacii variacionno-raznostnogo metoda* [Multilevel discrete and discrete-continuous implementations of the variational-difference method]. Moscow, ASV Publ., 2013. 416 p. (In Russian).
8. Mingalev O. V., Mel'nik M. N. Numerical solution of boundary value problems for the Poisson equation by the fast Fourier transform method using parallel calculations. *Trudy Kolskogo nauchnogo centra RAN* [Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2018, no. 5-4(9), pp. 165–182. (In Russian).
9. Akimov P. A., Belostotskiy A. M., Mozgaleva M. L., Mojtaba Aslami, Negrozov O. A. Correct multilevel discrete-continual finite element method of structural analysis. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 1040, pp. 664–669.
10. Akimov P. A., Sidorov V. N. Correct method of

- analytical solution of multipoint boundary problems of structural analysis for systems of ordinary differential equations with piecewise constant coefficients. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 250-253, pp. 3652–3655.
11. Sharfanec B. P., SHarfanec E. B. On the choice of methods for solving the Poisson equation in the general case of the volume charge density distribution and on setting boundary conditions in electrokinetic problems (review). *Nauchnoe priborostroenie*, 2015, vol. 25, no. 1, pp. 65–75. (In Russian).
 12. Vladimirov V. S. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 512 p. (In Russian).
 13. Koshlyakov N. S., Gliner E. B., Smirnov M. M. *Uravneniya v chastnykh proizvodnykh matematicheskoy fiziki* [Partial differential equations of mathematical physics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970. 712 p. (In Russian).
 14. Vorozhcov E. V., Shapeev V. P. Numerical solution of the Poisson equation in polar coordinates by the method of collocations and least residuals. *Modelirovanie i analiz informacionnyh sistem*, 2015, vol. 22, no. 5, pp. 648–664. (In Russian).
 15. Knyazev S. Yu., Shcherbakova E. E., Engibaryan A. A. Numerical solution of boundary value problems for the Poisson equation by the method of point field sources. *Vestnik DLGTU*, 2014, vol. 15, no. 2(77), pp. 15–20. (In Russian).
 16. Dobeshi I. *Desyat' lekcij po veyvletam* [Ten lectures on wavelets]. Izhevsk, NIK «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika» Publ., 2001. 464 p. (In Russian).
 17. Chui K. *Vvedenie v veyvlety* [Introduction to Wavelets]. Moscow, Mir Publ., 2001. 412 p. (In Russian).

Для цитирования: Акимов П. А., Мозгалева М. Л., Кайтуков Т. Б. Локализация решения краевой задачи для уравнения Пуассона на основе В-сплайнов // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 9. С. 4–11. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.04-11.

For citation: Akimov P. A., Mozgaleva M. L., Kaytukov T. B. Localization of Solution of Boundary Problem for Poisson's Equation With the Use of B-Spline Wavelet-Based. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2021, no. 9, pp. 4–11. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.04-11.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ) как ведущий университет отраслевого консорциума «Строительство и архитектура» и Федерального учебно-методического объединения в системе высшего образования по укрупненным группам специальностей и направлений подготовки «Техника и технологии строительства» осуществляет подготовку кадров в рамках дополнительного профессионального образования.

Центр дополнительного профессионального образования (ЦДПО) НИУ МГСУ приглашает получить дополнительную квалификацию в рамках следующих программ:

1. «Особенности раздела КР на всех стадиях жизни проекта для руководителей и ГИПа». Форма обучения: очно-заочная. Трудоемкость обучения: 40 ак. ч. Стоимость обучения: 32 000 р.
2. «Реализация численных и численно-аналитических методов в системе МАТЛАБ». Форма обучения: очно-заочная. Трудоемкость обучения: 16 ак. ч. Стоимость обучения: 8000 р.
3. «Расчет стального каркаса промышленного здания с мостовыми кранами с использованием программного комплекса «SCAD Office 21.1». Форма обучения: очно-заочная. Трудоемкость обучения: 16 ак. ч. Стоимость обучения: 15 000 р.
4. «Современные методы моделирования и ин-

женерных расчетов с применением ПК ANSYS». Форма обучения: очно-заочная. Трудоемкость обучения: 16 ак. ч. Стоимость обучения: 8000 р.

5. «Современные методы моделирования и инженерных расчетов. ПК Maple». Форма обучения: очно-заочная. Трудоемкость обучения: 16 ак. ч. Стоимость обучения: 8000 р.

6. «Современные методы моделирования и инженерных расчетов с применением ПК Mathcad». Форма обучения: очно-заочная. Трудоемкость обучения: 16 ак. ч. Стоимость обучения: 8000 р.

7. «Современные методы моделирования и инженерных расчетов. ПК Wolfram Mathematica». Форма обучения: очно-заочная. Трудоемкость обучения: 16 ак. ч. Стоимость обучения: 8000 р.

8. «Современные методы моделирования и инженерных расчетов с применением ПК ЛИРА». Форма обучения: очно-заочная. Трудоемкость обучения: 16 ак. ч. Стоимость обучения: 8000 р.

9. «ЛИРА 10. Расчет строительных конструкций. Базовый курс.» Форма обучения: очно-заочная. Трудоемкость обучения: 62 ак. ч. Стоимость обучения: 26 000 р.

Дополнительную информацию можно получить по тел.: +7 (495) 783-86-39, 8 (495) 287-49-14 (доб. 2412, 2415, 2495, 1334), e-mail: cdpo@mgsu.ru или на сайте: www.dpo.mgsu.ru.

Апробация требований к устройству «зеленых» крыш в городской застройке

Валерий Иванович ТЕЛИЧЕНКО¹, академик РААСН, доктор технических наук, профессор, e-mail: president@mgsu.ru

Андрей Александрович БЕНУЖ¹, кандидат технических наук, доцент, советник РААСН, e-mail: benuzhaa@mgsu.ru

Илья Валерьевич МОЧАЛОВ^{1,2}, генеральный директор, аспирант НИУ МГСУ, e-mail: mochalov@imip.ru

Алексей Вячеславович БОГАЧЕВ¹, магистрант, e-mail: alexbog.lem@yandex.ru

¹ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

² ООО «Илья Мочалов и Партнеры», 129594 Москва, Шереметьевская ул., 34

Аннотация. Статья посвящена проблеме создания условий комфортной среды жизнедеятельности и снижения антропогенных воздействий на окружающую среду в условиях плотной городской застройки за счет применения «зеленых» технологий с целью повышения экологической безопасности строительства и городского хозяйства. Одна из таких технологий – «зеленая» крыша. Обобщен опыт разработки отечественных проектов создания «зеленых» крыш в России и показаны возможности, которые позволят дать их реализация. Отечественная нормативная база в области озеленения крыш, и в целом «зеленого» строительства, пока комплексно неразвита в отличие от международного опыта и практики применения таких стандартов. Однако в России с каждым годом становится все больше проектов, которые популяризируют преимущества «зеленых» крыш и способствуют развитию новых «зеленых» технологий. Применяемые ранее стандарты были в основном зарубежными, а немногочисленные отечественные аналоги основаны на международной рейтинговой системе сертификации. Сделан вывод о том, что принятие первого национального стандарта по озеленению крыш – важный шаг на пути становления и развития технологии озеленения кровли в нашей стране. Обозначена важность дальнейшей разработки нормативных документов, содержащих требования, соответствующие передовому опыту «зеленого» строительства.

Ключевые слова: национальные «зеленые» стандарты, «зеленое» строительство, «зеленая» крыша, устойчивое развитие, экологическая безопасность, городская застройка.

APPROBATION OF THE REQUIREMENTS FOR THE CONSTRUCTION OF “GREEN” ROOFS OF URBAN DEVELOPMENT

Valery I. TELICHENKO¹, e-mail: president@mgsu.ru

Andrey A. BENUZH¹, e-mail: benuzhaa@mgsu.ru

Ilya V. MOCHALOV^{1,2}, e-mail: mochalov@imip.ru

Aleksey V. BOGACHEV¹, e-mail: alexbog.lem@yandex.ru

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavlshosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

² Ilya Mochalov and Partners, Sheremetyevskaya ul., 34, Moscow 129594, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the problem of creating conditions for a comfortable living environment and reducing anthropogenic impacts on the environment in conditions of dense urban development through the use of “green” technologies to improve the environmental safety of construction and urban economy. One of such technologies is the “green” roof. The experience of developing domestic projects for creating “green” roofs in Russia and the opportunities that their implementation can give is summarized. The domestic regulatory framework in the field of roof greening, and in general “green” construction, is still comprehensively undeveloped, in contrast to the international experience and practice of applying such standards. However, in the Russian Federation there are more and more projects related to greening roofs become available every year, which popularize the advantages of “green” roofs and promote the development of new “green” technologies. Previously applied standards were mainly foreign, and a few domestic analogues are based on the international rating system of certification. It is concluded that the adoption of the first national standard for roof greening is an important step towards the formation and development of roof greening technology in our country. The importance of further development of regulatory documents containing requirements corresponding to the best practices of “green” construction is indicated.

Key words: national «green» standards, “green” construction, “green” roof, sustainable development, environmental safety, urban development.

Введение

Президентом Российской Федерации 30 апреля 2012 г. были

утверждены «Основы государственной политики в области экологического развития Россий-

ской Федерации на период до 2030 г.», принятые в связи с глобальными экологическими проб-

лемами, связанными с техногенными катастрофами, загрязнением атмосферного воздуха и другими негативными для окружающей среды процессами [1].

На сегодняшний день в России в основном учитываются только расходы на проектирование и строительство, что составляет всего 20 % затрат на протяжении всего жизненного цикла здания [2]. Такое положение вещей противоречит принципам устойчивого развития и «зеленого» строительства. Поэтому возможность разрешения ряда экологических, экономических и социальных проблем за счет внедрения и популяризации «зеленых» технологий, в частности горизонтального озеленения крыш, — актуальная задача. Положительные результаты подобных практик позволяют привлечь внимание политических деятелей и общественности [3].

Применение «зеленых» крыш в плотной городской застройке способствует повышению концентрации кислорода. Они влияют на очищение воздуха от вредных веществ и пыли, снижают нагрузку на водоотводящую ливневую систему [4]. Кроме того, озеленение крыш может увеличить количество рекреационных пространств и компенсировать «зеленую» зону, занимаемую площадью возведенного здания.

Успешной практикой «зеленого» строительства считается тогда, когда «зеленые» технологии образуют единую систему и их влияние учитывается на протяжении всего жизненного цикла здания или сооружения. Популяризация, возникновение и развитие новых технологий в отрасли «зеленого» строительства возможно за счет грамотного внедрения и экономического стимулирования «зеленых» стандартов, норм и требований на законодательном уровне. Например, в Европей-

ском «зеленом» курсе и новой промышленной стратегии для Европы указывается важность разработки новых стандартов с целью построения устойчивого развития. Стандарты могут сыграть большую роль в распространении научных открытий и изобретений в направлении перехода к «зеленым» и цифровым технологиям [5].

В 2009 г. компания ООО «Илья Мочалов и Партнеры» одной из первых в России возвела озелененную крышу на административном здании в Москве на Шереметьевской ул. [6]. Данное озеленение крыши послужило отправной точкой для научно-исследовательской работы в области технологий по озеленению крыш, а в конечном итоге — утверждению в России ГОСТ Р 58875—2020 «Зеленые» стандарты. Озеленяемые и эксплуатируемые крыши зданий и сооружений. Технические и экологические требования».

Цель статьи — демонстрация реального внедрения требований ГОСТ Р 58875 к устройству «зеленых» крыш в России.

Международный и российский опыт «зеленого» строительства

Наибольшее влияние в мире на «зеленые» технологии оказали такие системы по добровольной сертификации с рейтинговой системой, как стандарты BREEAM (Великобритания) и LEED (США). Их активное использование было достигнуто за счет следующих причин: при планировании строительства органы местного самоуправления стали требовать прохождения сертификации по данным стандартам.

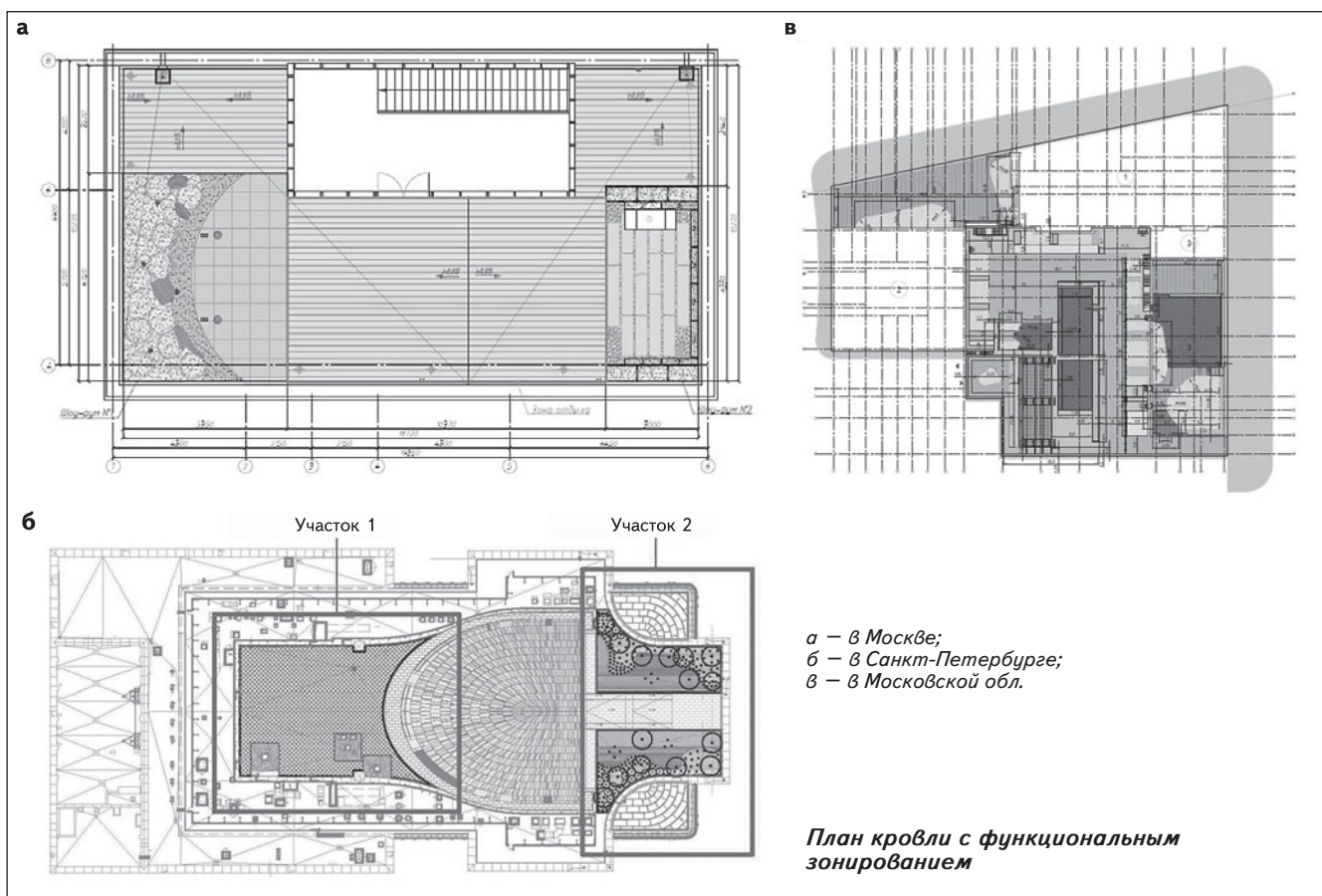
В свою очередь застройщиками был добровольно определен перечень требований для нового строительства. Минимальные базовые требования стали регламентироваться на всех этапах

проектирования и строительства на законодательном уровне [7].

Перечисленные мероприятия привлекли внимание общества к экологической безопасности и значимости «зеленого» строительства и способствовали возникновению положительного опыта нормирования в области «зеленой» стандартизации. Так, например, все новые административные здания в Чикаго должны предусматривать озеленение покрытия кровли, а в Торонто при жилой коммерческой или служебной застройке с площадью более 2000 м² необходимо производить озеленение кровель [6]. Множество зданий в Европе и США удалось сертифицировать за счет одновременной работы архитекторов, проектировщиков, инженеров, конструкторов и консультантов с самого начала реализации проекта [8, 9]

На данный момент в России применение «зеленых» крыш не является массовым, а имеет единичный частный характер, зависящий от желания заказчика или застройщика. Ярким скачком в применении технологии озеленения крыш и их сертификации стало строительство олимпийских объектов в Сочи в 2014 г. На 11 объектах Олимпийского парка в Сочи применялись стандарты BREEAM или отечественные экспериментальные аналоги. Данный опыт положительно повлиял на возникновение нормативно-технической документации в области «зеленых» технологий, и был принят первый «зеленый» стандарт [10].

В связи с повышением внимания в профессиональной среде к озеленению кровель как инструменту достижения экологической безопасности, устойчивого развития городов, восстановления и расширения «зеленых» городских пространств [11], в 2016 г. был сформирован технический комитет по стандартизации «Зе-



ленные» технологии среды жизнедеятельности и «зеленая» инновационная продукция» (ТК 366), благодаря деятельности которого в систему нормативной документации РФ вошел ГОСТ Р 58875, принятый в 2020 г. [12]. Это первый национальный стандарт по озеленению крыш.

Внедрение требований ГОСТ Р 58875

ТК 366 является формой сотрудничества заинтересованных организаций, органов власти и физических лиц при проведении работ по национальной, межгосударственной и международной сертификации в области «зеленого» строительства [13, 14]. В разработке ГОСТ Р 58875 активное участие принимала компания ООО «Илья Мочалов и Партнеры». Используя уже имеющийся опыт компании в проектировании и возведении крышного озелене-

ния, было принято решение внедрять требования национального стандарта ГОСТ Р 58875 во все вновь проектируемые объекты капитального строительства с целью оценки эффективности его требований.

Важное преимущество ГОСТ Р 58875 — четкая структура типологии «зеленых» крыш. Такая структура на раннем этапе обеспечивает точное определение назначения кровли, ее функциональных особенностей, перечня применяемых растений, необходимого основания под кровлю и предельных нагрузок и воздействий.

В период 2019–2021 гг. компанией ООО «Илья Мочалов и Партнеры» был реализован ряд объектов по озеленению кровель в соответствии с ГОСТ Р 58875.

1. Проект устройства озеленения шоу-румов террас на эксплуатируемой кровле жилого комп-

лекса с объектами социальной инфраструктуры (Москва, ул. Восточная, влд. 4А/1, заказчик «Инград»). Согласно типологии ГОСТ Р 58875 кровля является озелененной и эксплуатируемой (см. рисунок а).

На кровле используется мобильное и стационарное озеленение. Мобильное озеленение представлено контейнерами (фибробетонные кашпо) с посаженными в них кустарниками или с многолетниками, которые в дальнейшем устанавливаются на эксплуатируемое покрытие кровли. В кашпо из фибробетона предусмотрены дренажные отверстия для отвода лишней влаги из их внутреннего объема в систему общего водоотвода. Стационарное озеленение имеет смешанный характер, используется двух типов: экстенсивного, с толщиной субстратного слоя 90–130 мм (посадка почвопок-

ровных растений и седумов) и интенсивного, с толщиной субстратного слоя 370–700 мм (посадка кустарников). Выбор типов озеленения и подбор растений для них соответствуют положениям ГОСТ Р 58875.

Несущей конструкцией кровли служит сталежелезобетонное перекрытие с монолитной плитой по стальному профилированному настилу, общей толщиной 125 мм. Данная конструкция может служить основанием под эксплуатируемую кровлю согласно п. 4.1 ГОСТ Р 58875. Сталежелезобетонное перекрытие опирается на прогонно-балочную систему.

По функциональному назначению крыша предназначена исключительно под пешеходную нагрузку. На кровле возможна организация собраний людей и установка мебели и оборудования, согласно решениям разработанной проектной документации в соответствии с ГОСТ Р 58875.

2. Устройство озеленения крыши и интерьера Дворца танцев Б. Эйфмана (Санкт-Петербург, просп. Добролюбова, заказчик ФГБУ «УЗС СЗФО»). Согласно ГОСТ Р 58875 кровля озелененная и эксплуатируемая (см. рисунок б).

В данном случае принято стационарное озеленение, которое имеет смешанный характер и используется двух типов: экстенсивного (толщина субстратного слоя 100 мм) и интенсивного (200–400 мм). Выбор типов озеленения и подбор растений для них соответствуют положениям ГОСТ Р 58875.

Несущей конструкцией кровли служит сплошное безбалочное перекрытие из монолитного железобетона толщиной 200 мм. Такая конструкция может быть основанием под эксплуатируемую кровлю согласно п. 4.1 ГОСТ Р 58875.

Функциональное назначение эксплуатируемой кровли — иск-

лючительно под пешеходную нагрузку. Здесь возможна организация отдыха людей и установка садовой мебели (скамейки, урны и т. д.) и оборудования в соответствии с ГОСТ Р 58875.

3. Проект благоустройства территории многофункциональной комплексной застройки: комплекс А5 в составе корпусов 11, 12, подземного паркинга (Московская обл., Одинцовский район, д. Раздоры, заказчик «Самолет Девелопмент»). Под благоустройством подразумевается проект эксплуатируемой «зеленой» кровли подземной автостоянки (см. рисунок в). Согласно типологии ГОСТ Р 58875 покрытие кровли относится к инверсионному типу.

Озеленение кровли — мобильное и стационарное. Мобильное озеленение представлено контейнерами с посаженными в них растениями, которые в дальнейшем устанавливают на эксплуатируемое покрытие кровли. Стационарное озеленение имеет смешанный характер и используется двух типов: полуинтенсивного (посадка в газонный субстрат трав и мелких кустарников) и интенсивного типа (посадка крупных кустарников и деревьев).

Несущая конструкция кровли — сплошная монолитная железобетонная плита толщиной 350 мм. По функциональному назначению предназначена под пешеходную нагрузку и возможность проезда пожарной машины.

При реализации перечисленных проектов в соответствии с ГОСТ Р 58875 был сделан акцент на достижение требований по повышению экологической безопасности (качество и пригодность субстратной смеси, подбор климатически стойких растений, устройство дренажа и озеленение с целью компенсации «зеленой» территории). Тип и состав субстрата подбирался согласно п. 5.4.1 ГОСТ Р 58875. Также

стандарт регламентирует влагоемкость субстрата как параметр, влияющий на нагрузку на водоотводящую систему.

К дренажному слою предъявляются особенно важные требования. Необходимо применять именно двояковыпуклые дренажные элементы, а не дренажные мембраны. Дренажный элемент работает как на накопление влаги, так и на ее отвод при избыточном количестве. В свою очередь, дренажная мембрана работает либо на накопление, либо на отвод в зависимости от способа ее устройства. Состав конструкции кровельного пирога, примененный на объектах и соответствующий рассматриваемому стандарту, приведен далее.

Состав кровельного пирога

Отсев гравийный (фр. 5–10 мм), мм 30–50
 Субстрат для кровельного озеленения, мм 200–600
 Системный фильтр ТГ (ЦинКо РУС, Россия), слой . . . 1
 Флорадрейн ФД40 (ЦинКо РУС, Россия), мм 40
 Влагонакопительный и защитный мат ССМ (ЦинКо РУС, Россия), слой . . . 1
 Противокорневая пленка (барьер) ВСФ (ЦинКо РУС, Россия), слой . . . 2
 Геотекстиль Дорнит ИГ 200 (ГОСТ Р 53225–2008), слой . . . 1

Правильное устройство всех слоев кровельного пирога способствует снижению влияния на ливневую канализацию, что является эффективным мероприятием по достижению экологической безопасности [15].

Вывод

Проведенные исследования показали, что применение «зеленых» крыш с учетом соблюдения требований ГОСТ Р 58875 способствует повышению экологической безопасности строительства и городского хозяйства.

Подбор субстрата и растений, согласно требованиям нового стандарта, позволяет создать на кровле систему устойчивого озеленения, способствует долговременному повышению качества атмосферного воздуха, воспол-

нению зеленых насаждений города, снижению нагрузки на ливневую систему. Кроме того, озеленение кровель экономически выгоднее в долгосрочной перспективе в отличие от традиционных кровель [16]. Внедрение

ГОСТ Р 58875 – важный этап в развитии нормативной базы в строительстве зданий и сооружений, а также в создании добровольных и обязательных систем сертификации в Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года // Аналитический вестник Совета Федерации Федерального собрания РФ. 2017. № 11(668). С. 70.
2. URL: <https://expert.ru/expert/2019/25/mnogoetazhki-eto-toksichnyij-aktiv-s-korotkim-srokom-zhizni/> (дата обращения 01.08.2021).
3. Бенуж А. А., Колчигин М. А. Анализ концепции «зеленого» строительства как механизма по обеспечению экологической безопасности строительной деятельности // Вестник МГСУ. 2012. № 12. С. 161–165.
4. Жадан О. В., Смирнова Л. А. Экологические преимущества устройства кровель с применением технологии озеленения // Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения. 2019. Ч. 2. С. 14–17.
5. URL: <https://www.gostinfo.ru/News/Details/1270#.YROzaPJxdaQ> (дата обращения 01.08.2021).
6. Теличенко В. И., Бенуж А. А., Мочалов И. В. Формирование комфортной городской среды // Недвижимость: экономика, управление. 2017. № 1. С. 30–33.
7. Теличенко В. И., Бенуж А. А. Обзор и классификация рейтинговых систем сертификации зданий и сооружений // Вестник ВолгГАСУ. 2013. Вып. 31(50). С. 239–243.
8. Колчигин М. А., Бенуж А. А. Основы государственной политики в формировании национального стандарта «зеленого» строительства для оценки объектов недвижимости // Вестник МГСУ. 2012. № 12. С. 177–181.
9. Paul F. Downtown ecopolis: architecture and cities for a changing climate [Экополис: архитектура и города против изменения климата]. New York, Springer Publ., 2009. 628 p.
10. Теличенко В. И., Бенуж А. А. Совершенствование принципов устойчивого развития на основе опыта применения «зеленых» стандартов при строительстве олимпийских объектов в Сочи // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 10. С. 40–43.
11. Бенуж А. А., Мочалов И. В. Зеленые кровли для устойчивых городов: перспективы использования в Москве // Вестник Университета Правительства Москвы. 2018. № 4. С. 48–53.
12. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902369004> (дата обращения 01.08.2021).
13. Теличенко В. И., Слесарев М. Ю. «Зеленая» стандартизация будущего – фактор экологической безопасности среды жизнедеятельности // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 8. С. 90–97.
14. Теличенко В. И., Слесарев М. Ю. «Зеленая» стандартизация технологий формирования природоподобной среды жизнедеятельности // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 5(116). С. 558–567. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.558-567
15. Красногорская Н. Н., Мусина С. А., Хасанова Л. Ф., Щелкова А. И. Статистический анализ литературных данных по проблеме управления ливневым стоком с помощью использования «зеленых» крыш // Научные достижения и открытия: сб. ст. X Междунар. научно-исследовательского конкурса (20 июня 2019 г., Пенза). Пенза : Наука и Просвещение, 2019. С. 68–72.
16. Бенуж А. А., Богачев А. В. Влияние озеленения кровли на энергоэффективность здания // Academia. Архитектура и строительство. 2021. № 2. С. 117–122. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-2-117-122.

REFERENCES

1. Fundamentals of the state policy in the field of environmental development of the Russian Federation for the period up to 2030. *Analiticheskiy vestnik Soveta Federatsii Federalnogo sobraniya RF*, 2017, no. 11(668), pp. 70. (In Russian).
2. Available at: <https://expert.ru/expert/2019/25/mnogoetazhki-eto-toksichnyij-aktiv-s-korotkim-srokom-zhizni/> (accessed 02.08.2021). (In Russian).
3. Benuzh A. A., Kolchigin M. A. Analysis of the concept of “green” construction as a vehicle to ensure the environmental safety of construction activities. *Vestnik MGSU*, 2012, no. 12, pp. 161–165. (In Russian).
4. Zhadan O. V., Smirnova L. A. Ecological advantages of the device of roofs with the use of landscaping technology. *Nauchnoye obespecheniye razvitiya APK v usloviyakh importozameshcheniya*, 2019, pp. 14–17. (In Russian).
5. Available at: <https://www.gostinfo.ru/News/Details/1270#.YROzaPJxdaQ> (accessed 02.08.2021). (In Russian).

6. Telichenko V. I., Benuzh A. A., Mochalov I. V. Creating a comfortable urban environment. *Nedvizhimost: ekonomika, upravleniye*, 2017, no. 1, pp. 30–33. (In Russian).
7. Telichenko V. I., Benuzh A. A. Review and classification of rating systems for certification of buildings and structures. *Vestnik VolgGASU*, 2013, vol. 31(50), pp. 239–243. (In Russian).
8. Kolchigin M. A., Benuzh A. A. State policy fundamentals in formation of a national standard of "green" construction for assessment of items of real property. *Vestnik MGSU*, 2012, no. 12, pp. 177–181. (In Russian).
9. Paul F. *Downtown ecopolis: architecture and cities for a changing climate*. New York, Springer Publ., 2009. 628 p.
10. Telichenko V. I., Benuzh A. A. Improving the principles of sustainable development on the basis of experience of "green" standards application in the construction of olympic facilities in Sochi. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*, 2014, no. 10, pp. 40–43. (In Russian).
11. Benuzh A. A., Mochalov I. V. "Green" rooftops for sustainable cities: prospects of use in the city of Moscow. *Vestnik Universiteta Pravitel'stva Moskvu*, 2018, no. 4, pp. 48–53. (In Russian).
12. Available at: <https://mgsu.ru/science/technical-committee-366/> (accessed 02.08.2021). (In Russian).
13. Telichenko V. I., Slesarev M. Yu. "Green" standardization of the future is the factor of environmental safety of the environment of lifetime. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*, 2018, no. 8, pp. 90–97. (In Russian).
14. Telichenko V. I., Slesarev M. Yu. "Green" standardization of technologies for forming the nature-friendly living environment. *Vestnik MGSU*, 2018, vol. 13, iss. 5(116), pp. 558–567. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.558-567. (In Russian).
15. Krasnogorskaya N. N., Musina S. A., Khasanova L. F., Shchelkova A. I. Statisticheskiy analiz literaturnykh dan-nykh po probleme upravleniya livnevym stokom s pomoshchyu ispolzovaniya zelenykh krysh. *Nauchnyye dostizheniya i otkrytiya. Sbornik statey X Mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa [Scientific achievements and discoveries: collection of articles of the X International Scientific Research Competition (June 20, 2019, Penza)]*. Penza, Nauka i Prosveshcheniye Publ. 2019, pp. 68–72. (In Russian).
16. Benuzh A. A., Bogachev A. V. The effects from the green roofs on the energy efficiency of buildings. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*, 2021, no. 2, pp. 117–122. (In Russian). DOI: 10.22337/2077-9038-2021-2-117-122.

Для цитирования: Теличенко В. И., Бенуж А. А., Мочалов И. В., Богачев А. В. Аprobация требований к устройству «зеленых» крыш в городской застройке // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 9. С. 12–17. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.12-17.

For citation: Telichenko V. I., Benuzh A. A., Mochalov I. V., Bogachev A. V. Approbation of the Requirements for the Construction of "Green" Roofs of Urban Development. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*, 2021, no. 9, pp. 12–17. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.12-17. ■

Центр дополнительного профессионального образования (ЦДПО) НИУ МГСУ приглашает получить дополнительную квалификацию в рамках следующих программ:

1. «Проблематика архитектуры в направлении устойчивого развития». Форма обучения: очно-заочная. Трудоемкость обучения: 72 ак. ч. Стоимость обучения: 31 000 р.

2. «Деятельность ГИПа в современных условиях». Форма обучения: заочная. Трудоемкость обучения: 140 ак. ч. Стоимость обучения: 70 000 р.

3. «Организация архитектурно-строительного проектирования для главного инженера проекта (ГИПа)». Форма обучения: очная, с применением электронных форм обучения. Трудоемкость обучения: 1368 ак. ч. Режим обучения: по субботам с 10:00 до 17:00 (продолжительность обучения: один год). Стоимость обучения: 250 000 р. (предусмотрены скидки).

4. «Организация градостроительной деятельности». Форма обучения: очно-заочная с применением ЭО и ДОТ. Трудоемкость обучения: 90 ак. ч. Продолжительность обучения: 3 мес. Стоимость обучения: 42 500 р.

5. «Проектирование малоэтажных жилых зданий. Архитектура и инженерные системы». Форма обучения: очно-заочная. Трудоемкость обучения: 32 ак. ч. Стоимость обучения: 15 700 р.

6. «Дизайн интерьера общественного и жилого пространства». Форма обучения: очно-заочная. Трудоемкость обучения: 72 ак. ч. Стоимость обучения: 36 000 р.

Дополнительную информацию можно получить по тел.: +7 (495) 783-86-39, 8 (495) 287-49-14 (доб. 2412, 2415, 2495, 1334), e-mail: cdpo@mgsu.ru или на сайте: www.dpo.mgsu.ru.

Осадка и длительная несущая способность сваи

Завен Григорьевич ТЕР-МАТИРОСЯН, доктор технических наук, профессор, e-mail: gic-mgsu@mail.ru

Армен Завенович ТЕР-МАТИРОСЯН, доктор технических наук, e-mail: gic-mgsu@mail.ru

Любовь Юрьевна ЕРМОШИНА, аспирантка, e-mail: lyubov.ermoshina1801@mail.ru

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. Изучением несущей способности и осадки одиночной сваи занимались многие ученые, в работах которых представлены теоретические и численные исследования, выполненные в различных программных комплексах. В этой работе рассмотрена задача о взаимодействии глинной и несжимаемой сваи с окружающим и подстилающим грунтами в упругой и упруговязкой постановке с целью определения стабилизированной и нестабилизированной (длительной) осадки, а также длительной несущей способности одиночной сваи. Представлен ход решения поставленных задач, а также основные формулы для расчета осадки и несущей способности одиночной сваи в упругой и упруговязкой постановке. Для описания реологических свойств грунтов при сдвиге в качестве расчетной использовали реологическую модель А. З. Тер-Матиросяна, которая позволяет описать все три основных вида реологических кривых: ползучести, релаксации напряжений и кинематического сдвига. На основе выполненных исследований установлено, что стабилизированная осадка одиночной сваи напрямую зависит от ее геометрических параметров и модуля сдвига окружающего сваю грунта, а длительная осадка одиночной сваи — от изменяющейся во времени средневзвешенной вязкости грунта вокруг сваи.

Ключевые слова: осадка, длительная несущая способность, одиночная свая, окружающий и подстилающий грунты.

SETTLEMENT AND LONG-TERM BEARING CAPACITY OF THE PILE

Zaven G. TER-MARTIROSYAN, e-mail: gic-mgsu@mail.ru

Armen Z. TER-MARTIROSYAN, e-mail: gic-mgsu@mail.ru

Lyubov Yu. ERMOSHINA, e-mail: lyubov.ermoshina1801@mail.ru

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

Abstract. The study of the bearing capacity and settlement of a single pile is quite an urgent task that many scientists have been engaged in, whose works present theoretical and numerical studies performed in various software complexes. In this work, the problem of the interaction of a long and incompressible pile with the surrounding and underlying soils in elastic and elastic-viscous formulations is considered in order to determine the values of stabilized and unstabilized (long-term) settlements, as well as the long-term bearing capacity of a single pile. The course of solving the tasks, as well as the basic formulas for calculating the settlement and bearing capacity of a single pile in elastic and elastic-viscous formulations is presented. To describe the rheological properties of soils under shear, the A. Z. Ter-Martirosyan rheological model was used as a calculation model, which makes it possible to describing all three main types of rheological curves: creep, stress relaxation and kinematic shear. Based on the studies performed, it was established that the stabilized settlement of the single pile directly depends on its geometric parameters and on the shear modulus of the soil surrounding the pile, and the long-term settlement of the single pile depends on the time-varying average viscosity of the soil around the pile.

Key words: settlement, long-term bearing capacity, single pile, surrounding and underlying soils.

Введение

В настоящее время свайный фундамент — один из самых популярных типов фундаментов, применяемых на практике. При его проектировании особое внимание уделяется осадке и несущей способности сваи.

Трехлинейная модель разупрочнения для описания взаимодействия сваи и грунта вокруг нее, а также пластическая модель для описания взаимодействия сваи с грунтом, залегающим в ее основании, были рассмотрены в работе [1]. На основе механики грунтов и теории упругости авторами получены уравнения для описания зависимости осадки оди-

ночной сваи от вертикальной нагрузки в слоистых грунтах.

Анализ методом конечных элементов в двумерной постановке для оценки поведения одиночной вертикальной сваи во времени, внедренной в грунт с упругопластическими свойствами, выполнен в исследовании [2]. Для моделирования грунта вокруг сваи использовали линейно-упругую идеально-пластическую модель Мора—Кулона, а для моделирования материала сваи — линейно-упругую модель.

Простой подход к анализу упругопластического поведения одиночной сваи в слоистых грунтах, ко-

торый позволяет быстро оценить осадку одиночной сваи или группы свай, предложен в [3].

Теоретическое и численное решения (ПК PLAXIS 2D) задачи о взаимодействии длинной сваи с неоднородным грунтовым массивом приведены в [4].

Аналитический подход к нелинейному анализу осадки одиночной сваи под нагрузкой рассмотрен в работе [5], на основе которого разработана компьютерная программа. Авторы работы также провели сравнительный анализ предложенной методики с другими аналитическими методами и результатами полевых испытаний свай.

Решение задачи о взаимодействии длинной сжимаемой сваи с многослойным основанием позволило определить осадку одиночной сваи и наглядно показать изменение вертикального и касательного напряжения по глубине сваи с учетом ее сжимаемости. Эти результаты сравнены с данными, полученными численным расчетом методом конечных элементов в ПК PLAXIS 2D [6].

На основе модифицированной модели Бюргерса был разработан нелинейный подход к расчету осадки во времени вертикально нагруженной одиночной сваи и группы свай в слоистом мягком грунте [7].

Параметрическое исследование для изучения влияния свойств сваи и грунта, а также наличия прослойки прочного или слабого грунта на вертикальную осадку одиночной сваи выполнено в работе [8]. В результате этого предложен расчетный коэффициент, учитывающий оптимальное соотношение сторон, для получения подходящих размеров сваи.

Несущую способность и осадку одиночной сваи авторы [9] определяли на основе прямых измерений, а также по результатам проведения стандартных пенетрационных испытаний (SPT). Несущую способность одиночной сваи рассчитывали методом Майерхоффа по результатам N-SPT, а осадку одиночной сваи — полуэмпирическим методом.

Поведение и несущую способность одиночной сваи и группы свай при действии вертикальной и боковой нагрузок исследовали в работе [10].

Полуаналитическое решение для расчета долговременной осадки одиночной сваи, внедренной в вязкоупругие грунты основания, предложено в [11]. В работе представлена трехмерная вязкоупругая модель с производной дробного порядка для описания реологического поведения грунтов вокруг сваи.

Цель данной работы — определение стабилизированной и нестабилизированной (длительной) осадки, а также длительной несущей способности одиночной сваи при ее взаимодействии с окружаю-

щим и подстилающим грунтами в упругой и упруго-вязкой постановке.

Материалы и методы

Известно, что осадка и несущая способность одиночной сваи, которая внедрена в толщу грунтового массива, подстилаемого сравнительно плотными грунтами с модулем деформации более 40 МПа, — основные параметры для проектирования свайных фундаментов. Эти показатели зависят от длины и диаметра сваи, а также физико-механических свойств окружающих и подстилающих грунтов, в том числе реологических. Известно, что действующее постоянное усилие N на оголовок сваи распределяется между боковой поверхностью сваи T и ее нижним концом R в зависимости от длины и диаметра сваи, а также деформационных (E, ν), прочностных (c, φ) и реологических (η) свойств грунтов, причем $N = T + R$.

В качестве расчетной модели для описания реологических свойств (ползучести) грунтов при сдвиге использовали модель А. З. Тер-Мартirosяна [12]:

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau - \tau^*}{\eta_\gamma} \left(\frac{e^{-\alpha\gamma}}{a} + \frac{e^{\beta\gamma}}{b} \right), \quad (1)$$

где $\dot{\gamma}$ — скорость угловой деформации; τ — действующее касательное напряжение на образец при сдвиге; τ^* — предельное значение касательного напряжения на образец при сдвиге; η_γ — вязкость грунта; γ — угловая деформация; α, β, a, b — параметры упрочнения и разупрочнения глинистого грунта, определяемые по результатам экспериментальных исследований грунта в кинематическом режиме нагружения ($\dot{\gamma} = \text{const}$).

Рассмотрим случай, когда вязкость грунта увеличивается со временем, т. е. грунт упрочняется. Тогда представим $\eta_\gamma(t)$ в виде:

$$\eta_\gamma(t) = \gamma_0 + \alpha t \quad \text{или} \quad \eta_\gamma(t) = \eta_0 e^{\alpha t}. \quad (2)$$

Отметим, что согласно модели (1) скорость угловой деформации $\dot{\gamma}$ зависит от накопленной сдвиговой деформации $\dot{\gamma}(\gamma)$, т. е. γ , по существу, является мерой упрочнения согласно теории ползучести Ю. Н. Работнова [13].

Уравнение (1) интегрируется в ПК MathCad и позволяет описать все три основных вида реологических кривых:

- ползучести ($\gamma - t$) при разных $\tau = \text{const}$ (рис. 1);
- кинематического сдвига при разных $\dot{\gamma}$ и получить зависимость ($\tau - t$) (рис. 2);
- релаксации при τ_0 и $\gamma(t) = \gamma_0 = \text{const}$ и получить кривые ($\tau - t$) при разных начальных τ_0 и γ_0 (рис. 3).

Все кривые построены с помощью ПК MathCad при одних и тех же параметрах модели ($\alpha, \beta, a, b, \eta_\gamma$), что является преимуществом самой модели (1).

Аналогичным образом можно построить кри-

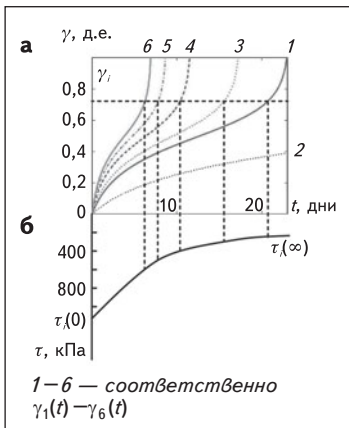


Рис. 1. Кривые ползучести ($\gamma - t$) при $\tau_1 > \tau_2 > \dots > \tau_n$ (а) и кривая длительной прочности (б)

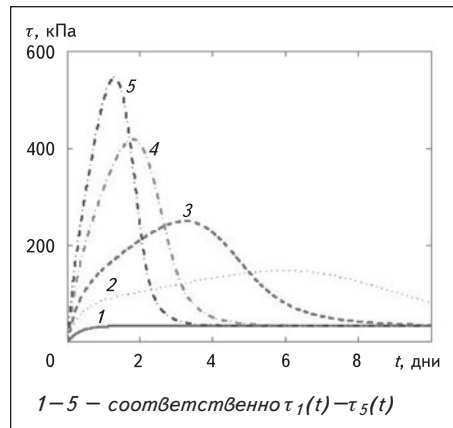


Рис. 2. Кривые ($\tau - t$) по результатам испытаний грунта в кинематическом режиме нагружения

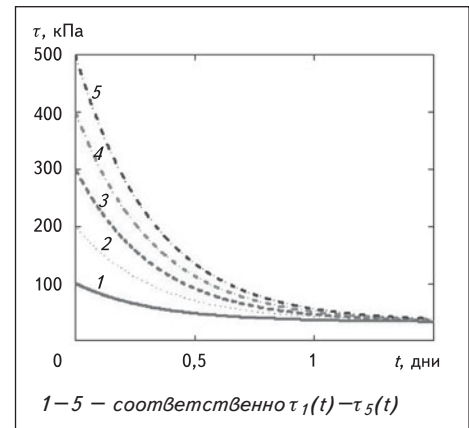


Рис. 3. Кривые релаксации напряжений сдвига при различных начальных напряжениях сдвига $\tau(0)$ и $\gamma = const$

вые зависимости ($\tau - t$) при кинематическом режиме нагружения ($\dot{\gamma} = const$), интегрируя уравнение вида

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau - \tau^*}{\eta_0} \left(\frac{e^{-\alpha\gamma}}{a} + \frac{e^{\beta\gamma}}{b} \right) + \frac{\dot{\tau}}{G} \quad (3)$$

Задавая различные значения скорости сдвига $\dot{\gamma}_1, \dot{\gamma}_2, \dots, \dot{\gamma}_n$, получим зависимости $\tau_1(t), \tau_2(t), \dots, \tau_n(t)$ (см. рис. 2).

В случае испытания образцов в режиме релаксации следует интегрировать выражение

$$\dot{\tau} + \frac{\tau}{\eta_0} G \left(\frac{e^{-\alpha\gamma}}{a} + \frac{e^{\beta\gamma}}{b} \right) = \frac{\tau^*}{\eta_0} G \left(\frac{e^{-\alpha\gamma}}{a} + \frac{e^{\beta\gamma}}{b} \right) \quad (4)$$

При начальном условии $t = 0, \tau = \tau(0)$ и фиксации начальной деформации $\gamma_0 = const$, задавая различные значения $\tau_0 = const$, получим семейство ($\tau - t$) (см. рис. 3).

Выполненные серии реологических испытаний образцов глинистых грунтов в приборе простого сдвига (перекашивания) в лаборатории механики грунтов НОЦ «Геотехника» НИУ МГСУ показали возможность определения параметров, входящих в модель (1).

Следует отметить, что кривые ползучести, релаксации и кинематического сдвига часто встречаются в испытаниях глинистых грунтов, в том числе различных плотности и влажности, степени водонасыщения, а также мерзлых, лёссовых и других грунтов.

Пусть длинная несжимаемая свая заданного диаметра $2a_1$ и длины l_1 внедрена в толщу грунтов и нижним концом опирается на подстилающий, сравнительно плотный слой ($E > 40$ МПа), проникая в него на величину $\Delta l \ll l_1$ (рис. 4).

Расчетная область вмещающего сваю массива представляет собой двухслойный грунтовый цилиндр конечных размеров ($L, 2b_1$).

Запишем условие равновесия:

$$N = T + R, \quad (5)$$

где N – нормальное усилие, действующее на оголовок сваи; T – сила трения, действующая по боковой поверхности сваи; R – расчетное сопротивление грунта основания сваи;

$$N = \pi a_1^2 \sigma_N; \quad R = \pi a_1^2 \sigma_R; \quad T = 2\pi a_1 l_1 \tau_a, \quad (6)$$

где σ_N и σ_R – нормальное напряжение, действующее соответственно на оголовок и под пятой сваи; τ_a – касательное напряжение, действующее по боковой поверхности сваи; a_1 и l_1 – радиус и длина сваи.

Из уравнений (5), (6) следует, что:

$$\begin{aligned} \pi a_1^2 \sigma_N &= 2\pi a_1 l_1 \tau_a + \pi a_1^2 \sigma_R, \\ \tau_a &= \frac{a_1}{2l_1} (\sigma_N - \sigma_R). \end{aligned} \quad (7)$$

Причем $\tau_a 2\pi a_1 = \tau_r 2\pi r$. Тогда

$$\tau_r = \tau_a \left(\frac{a_1}{r} \right), \quad (8)$$

где τ_r – касательное напряжение, действующее в точке r ; r – горизонтальная координата.

Осадку грунта (G_2, v_2) под пятой сваи определим по формуле для осадки круглого жесткого штампа с учетом K_I :

$$S_R = \sigma_R \frac{\pi a_1 (1 - v_2) \omega K_I}{4G_2}, \quad (9)$$

где G_2 и v_2 – модуль сдвига и коэффициент Пуассона подстилающего грунта; K_I – коэффициент, учитывающий влияние глубины пяты сваи, т. е. глубину приложения нагрузки на штамп, $K_I < 1$; ω – коэффициент, учитывающий форму штампа и его жесткость, для круглых, жестких штампов $\omega = 0,79$.

Перемещения грунтов вокруг сваи в соответст-

вии с телескопическим механизмом взаимных смещений концентрических цилиндров грунта толщиной $\Delta r = \text{const}$ можно определить по формулам:

$$S_r(r) = \int \gamma(r) dr + C; \quad (10)$$

$$\gamma(r) = -\tau_r / G_1, \quad (11)$$

где $\gamma(r)$ – угловая деформация в точке r ; G_1 – модуль сдвига окружающего сваю грунта.

При нелинейной постановке

$$\gamma(r) = -\frac{\tau_r}{G_1(\tau, \gamma)}. \quad (12)$$

Результаты исследования

Решим задачу в линейной постановке:

$$S_r(r) = -\int \frac{\tau_a a_1}{r G_1} dr + C. \quad (13)$$

Интегрируя это уравнение с учетом условия $S_r(r) = 0$ при $r = b_1$, получим

$$S_r(r) = \frac{\tau_a a_1}{G_1} \ln(b_1/r). \quad (14)$$

Тогда максимальное смещение грунта вокруг сваи при $r = a_1$ составит

$$S_a = \frac{\tau_a a_1}{G_1} \ln(b_1/a_1). \quad (15)$$

Из условия равенства перемещения грунта и сваи $S_r(0) = S_a = S_R$ получаем

$$\frac{\tau_a a_1}{G_1} \ln(b_1/a_1) = \sigma_R \frac{\pi a_1 (1 - \nu_2) \omega K_I}{4 G_2}. \quad (16)$$

Подставим в левую часть формулы (16) значение τ_a из (7):

$$\frac{a_1^2 (\sigma_N - \sigma_R)}{G_1 2 l_1} \ln(b_1/a_1) = \sigma_R \frac{\pi a_1 (1 - \nu_2) \omega K_I}{4 G_2};$$

$$\sigma_R \left\{ \frac{\pi (1 - \nu_2) \omega K_I G_1 l_1}{2 G_2 a_1 \ln(b_1/a_1)} + 1 \right\} = \sigma_N, \quad \sigma_R = \frac{\sigma_N}{A_1}; \quad (17)$$

$$A_1 = \frac{\pi (1 - \nu_2) \omega K_I G_1 l_1}{2 G_2 a_1 \ln(b_1/a_1)} + 1. \quad (18)$$

Заменим в уравнении (9) σ_R на значение из выражения (17) и, пренебрегая единицей, получим

$$S_R = \sigma_N \frac{a_1^2 \ln(b_1/a_1)}{2 G_1 l_1}. \quad (19)$$

Таким образом, задача в линейной постановке решена, так как $S_R = S_{св}$, где $S_{св}$ – осадка сваи.

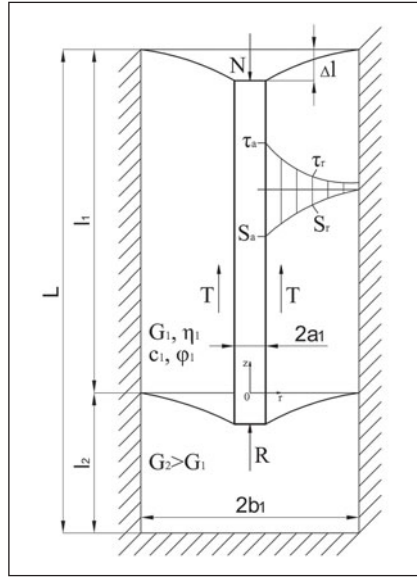


Рис. 4. Расчетная схема взаимодействия длинной и несжимаемой сваи с толстостенным грунтовым цилиндром и подстилающим слоем грунта

Перейдем к решению задачи в упруговязкой постановке. С учетом вязкого сопротивления окружающего сваю грунта $\dot{\gamma}$ составит при $\eta_1(t)$:

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\tau}_a}{G_1} + \frac{\tau_a}{\eta_1(t)}, \quad (20)$$

где $\dot{\tau}_a$ – скорость изменения касательного напряжения, действующего по боковой поверхности сваи; $\eta_1(t)$ – изменяющаяся средневзвешенная вязкость грунта вокруг сваи.

С учетом условия (7) и $\dot{\sigma}_N = 0$:

$$\dot{\tau}_a = -\dot{\sigma}_R \frac{a_1}{2 l_1}, \quad (21)$$

где $\dot{\sigma}_R$ – скорость изменения нормального напряжения под пятой сваи.

Скорость осадки окружающего грунта от действия касательных напряжений $\tau_r = \tau_a(a_1/r)$ в

упруговязкой постановке дает

$$\dot{S}_a = \frac{a_1 \tau_a}{\eta_1(t)} \ln(b_1/a_1) + \frac{a_1 \dot{\tau}_a}{G_1} \ln(b_1/a_1). \quad (22)$$

Скорость осадки сваи под пятой сваи можно определить по формуле (9), заменяя σ_R на $\dot{\sigma}_R$:

$$\dot{S}_R = \dot{\sigma}_R \frac{\pi a_1 (1 - \nu_2) \omega K_I}{4 G_2}. \quad (23)$$

Приравняв \dot{S}_a и \dot{S}_R , полагая, что $E_c \gg E_2$ с учетом условий (7) и (21), получаем:

$$(\sigma_N - \sigma_R) \frac{a_1^2}{2 l_1 \eta_1(t)} \ln(b_1/a_1) -$$

$$- \dot{\sigma}_R \frac{a_1^2}{2 l_1 G_1} \ln(b_1/a_1) = \dot{\sigma}_R \frac{\pi a_1 (1 - \nu_2) \omega K_I}{4 G_2}. \quad (24)$$

Выполнив определенную группировку, получаем дифференциальное уравнение вида:

$$\dot{\sigma}_R + \frac{\sigma_R}{\eta_1(t) A} = \frac{\sigma_N}{\eta_1(t) A}; \quad (25)$$

$$A = \frac{\pi (1 - \nu_2) \omega K_I l_1}{2 G_2 a_1 \ln(b_1/a_1)} + \frac{1}{G_1}. \quad (26)$$

Общее решение (25) известно [14] и имеет вид

$$\sigma_R = e^{-\int \frac{dt}{\eta_1(t) A}} \left\{ \int \frac{\sigma_N}{\eta_1(t) A} e^{\int \frac{dt}{\eta_1(t) A}} dt + C \right\}. \quad (27)$$

Рассмотрим решение (27) при $\eta_1(t) = \eta_0 = \text{const}$:

$$\sigma_R(t) = e^{-\frac{t}{\eta_0 A}} \left\{ \int \frac{\sigma_N}{\eta_0 A} e^{\frac{t}{\eta_0 A}} dt + C \right\} = \quad (28)$$

$$= e^{-\frac{t}{\eta_0 A}} \left\{ \sigma_N e^{\frac{t}{\eta_0 A}} + C \right\} = \sigma_N + C e^{-\frac{t}{\eta_0 A}}.$$

Постоянную интегрирования C определим из начального условия $t = 0$:

$$C = \sigma_R(0) - \sigma_N; \quad (29)$$

$$\sigma_R(t) = \sigma_N + (\sigma_R(0) - \sigma_N) e^{-\frac{t}{\eta_0 A}}, \quad (30)$$

где $\sigma_R(0)$ находят из линейной постановки (17).

Тогда получим:

$$\sigma_R(t) = \sigma_N \left(1 - e^{-\frac{t}{\eta_0 A}} \right) + \frac{\sigma_N}{A_1} e^{-\frac{t}{\eta_0 A}}. \quad (31)$$

Отсюда следует, что при $t \rightarrow \infty$ $\sigma_R(t) \rightarrow \sigma_N$.

Выводы

1. В настоящей работе была решена задача о взаимодействии длинной и несжимаемой сваи с окружающим и подстилающим грунтами в упругой и упруговязкой постановке.

2. При решении задачи в упругой постановке была определена стабилизированная осадка одиночной сваи, которая напрямую зависит от ее геометрических параметров (диаметр, длина), а также от модуля сдвига окружающего сваю грунта.

3. В случае решения в упруговязкой постановке рассчитана нестабилизированная (длительная) осадка одиночной сваи, зависящая от изменяющейся во времени средневзвешенной вязкости грунта вокруг сваи, а также длительная несущая способность одиночной сваи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-90076.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Liu J., Xiao H. B., Tang J., Li Q. S. Analysis of load-transfer of single pile in layered soil [Анализ переноса нагрузки одиночной сваи в слоистом грунте]. *Computers and Geotechnics*, 2004, vol. 31, iss. 2, pp. 127–135. DOI: 10.1016/j.compgeo.2004.01.001.
- Abbas M. I., Chik H. Z., Taha R. M., Shafiq S. M. Q. Time-dependent lateral response of pile embedded in elasto-plastic soil [Зависимость времени отклика сваи, погруженной в упругопластичный грунт]. *Journal of Central South University of Technology*, 2010, vol. 17, iss. 2, pp. 372–380. DOI: 10.1007/s11771-010-0055-x.
- Zhang Q.-Q., Zhang Z.-M. и He J.-Y. A simplified approach for settlement analysis of single pile and pile groups considering interaction between identical piles in multilayered soils [Упрощенный подход к расчетному анализу одиночных свай и групп свай с учетом взаимодействия между идентичными сваями в многослойных грунтах]. *Computers and Geotechnics*, 2010, vol. 37, iss. 7-8, pp. 969–976. DOI: 10.1016/j.compgeo.2010.08.003.
- Теличенко В. И., Тер-Мартirosян З. Г. Взаимодействие сваи большой длины с нелинейно деформируемым массивом грунта // Вестник МГСУ. 2012. № 4. С. 22–27.
- Telichenko V. I., Ter-Martirosyan Z. G. Interaction of a long pile with a nonlinearly deformable soil mass. *Vestnik MGSU*, 2012, no. 4, pp. 22–27 (In Russian).
- Zhang Q.-Q., Zhang Z.-M. A simplified nonlinear approach for single pile settlement analysis [Упрощенный нелинейный подход для анализа осадки одной сваи]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, vol. 49, iss. 11, pp. 1256–1266. DOI: 10.1139/T11-110.
- Тер-Мартirosян З. Г., Чинь Т. В. Взаимодействие одиночной длинной сваи с двухслойным основанием с учетом сжимаемости ствола сваи // Вестник МГСУ. 2012. № 4. С. 28–34.
- Ter-Martirosyan Z. G., Chin' T. V. Interaction of a single long pile with a two-layer base, taking into account the compressibility of the pile shaft. *Vestnik MGSU*, 2012, no. 4, pp. 28–34 (In Russian).
- Feng S., Li X., Jiang F., Lei L., Chen Z. A nonlinear approach for time-dependent settlement analysis of a single pile and pile groups [Нелинейный подход для анализа расчетов в зависимости от времени для одной сваи и групп свай]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2017, vol. 54, iss. 1, pp. 7–16. DOI: 10.1007/s11204-017-9426-8.
- Zhang Y., Wu W., Jiang G. et al. A new approach for estimating the vertical elastic settlement of a single pile based on the fictitious soil pile model [Новый подход к оценке вертикальной упругой осадки одной сваи на основе модели фиктивной грунтовой сваи]. *Computers and Geotechnics*, 2021, vol. 134, no. 104100. DOI: 10.1016/j.compgeo.2021.104100.
- Gazali A., Fathurrahman, Muthmainnah. Analysis study of soil bearing capacity and settlement of single pile foundation based on N-SPT data [Исследование несущей способности грунта и осадки свайного фундамента на основе данных SPT]. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science: 6th International Symposium on Wetlands Environmental Management (ISWEM 2020)*. Banjarmasin, 2021, vol. 758, iss. 1, no. 012023. DOI: 10.1088/1755-1315/758/1/012023.
- Stalin V. K., Priyadharshini A., Deepan P., Abudaheer A. Study on piles subjected to axial and lateral loading [Исследование свай под осевой и боковой нагрузкой] // Lecture Notes in Civil Engineering, 2021, vol. 133, pp. 527–541. DOI: 10.1007/978-981-33-6346-5_46.

11. Li X.-M., Zhang Q.-Q., Liu S.-W. Semianalytical solution for long-term settlement of a single pile embedded in fractional derivative viscoelastic soils [Полуаналитическое решение с производной дробного порядка для определения долговременной осадки одиночной сваи, заделанной в вязкоупругие грунты]. *International Journal of Geomechanics*, 2021, vol. 21, iss. 2, no. 0001906. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001906.
12. Тер-Мартirosян А. З. Взаимодействие фундаментов зданий и сооружений с водонасыщенным основанием при учете нелинейных и реологических свойств грунтов. Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2016. 324 с. URL: www.disserscat.com/content/.
12. Ter-Martirosyan A. Z. *Vzaimodejstvie fundamentov zdaniy i sooruzhenij s vodonasyshchennym osnovaniem pri uchete nelinejnyh i reologicheskikh svoystv gruntov* [Interaction of foundations of buildings and structures with a water-saturated base, taking into account the nonlinear and rheological properties of soils]. Doctor of Science thesis. Moscow, 2016. 324 p. Available at: www.disserscat.com/content/. (In Russian).
13. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М. : Наука, 1966. 752 с.
13. Rabotnov Yu. N. *Polzuchest elementov konstrukcij* [Creep of structural elements]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 752 p. (In Russian).
14. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. М. : Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. 608 с.
14. Bronshteyn I. N., Semendyaev K. A. *Spravochnik po matematike* [Handbook of Mathematics]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury Publ., 1962. 608 p. (In Russian).

Для цитирования: Тер-Мартirosян З. Г., Тер-Мартirosян А. З., Ермошина Л. Ю. Осадка и длительная несущая способность сваи // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 9. С. 18–23. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.18-23.

For citation: Ter-Martirosyan Z. G., Ter-Martirosyan A. Z., Ermoshina L. Yu. Settlement and Long-Term Bearing Capacity of the Pile. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2021, no. 9, pp. 18–23. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.18-23. ■

Центр дополнительного профессионального образования (ЦДПО) НИУ МГСУ и Институт строительства и архитектуры приглашают получить дополнительную квалификацию в рамках следующих программ:

1. «*Геотехнический прогноз влияния на окружающую застройку в ПК MIDAS GTS NX*». Форма обучения: очно-заочная. Трудоемкость обучения: 16 ак. ч. Стоимость обучения: 20 000 р.

2. «*Основы геотехники. Геотехнический прогноз влияния на окружающую застройку в ПК MIDAS GTS NX*». Форма обучения: очно-заочная. Трудоемкость обучения: 72 ак. ч. Стоимость обучения: 35 000 р.

3. «*Механика грунтов и геотехника. Решение геотехнических задач в ПК MIDAS GTS NX*». Форма обучения: очно-заочная. Трудоемкость обучения: 42 ак. ч. Стоимость обучения: 9 090 р.

4. «*Проектирование котлованов, строительство в стесненных условиях*». Форма обучения: очно-заочная. Трудоемкость обучения: 72 ак. ч. Стоимость обучения: 32 500 р.

В модуле «Основы геотехники» рассматриваются основные положения механики грунтов и геотехники при проектировании и строительстве зданий и сооружений. Подробно рассматриваются факторы, влияю-

щие на дополнительные осадки зданий, сооружений и подземных коммуникаций в зоне влияния нового строительства и реконструкции, наиболее распространенные модели грунтового пространства (Mohr-Coulomb, Hardening soil, Soft soil creep), их преимущества, недостатки, области применения и определение их параметров в полевых и лабораторных условиях. Показаны примеры расчетов на основании актуальных нормативных документов.

В модуле «Геотехнический прогноз влияния на окружающую застройку в ПК MIDAS GTS NX» рассматриваются основные приемы работы в программной среде MIDAS GTS NX. Программа предполагает двухдневный курс численного моделирования методом конечных элементов в сертифицированном ПК MIDAS GTS NX. Показано решение актуальных задач расчета напряженно-деформированного состояния грунтового массива в плоской и пространственной постановках, в том числе влияние нового строительства на окружающую застройку.

Дополнительную информацию можно получить по тел.: +7 (495) 783-86-39, 8 (495) 287-49-14 (доб. 2412, 2415, 2495, 1334), e-mail: cdpo@mgsu.ru или на сайте: www.dpo.mgsu.ru.

Обеспечение огнестойкости воздуховодов систем дымоудаления с огнезащитными покрытиями

Федор Александрович ПОРТНОВ, кандидат технических наук, e-mail: portnovfa@mgsu.ru

Татьяна Юрьевна ЕРЕМИНА, доктор технических наук, профессор, e-mail: ereminyu@mgsu.ru

Дмитрий Александрович КОРОЛЬЧЕНКО, кандидат технических наук, доцент, e-mail: korolchenkoda@mgsu.ru

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. Дан анализ состояния вопроса огнезащитности воздуховодов систем дымоудаления в зданиях и сооружениях. Показана проблема недостаточной изученности данного вопроса со стороны как теоретических в части моделирования поведения воздуховода в условиях пожара, так и практических аспектов, связанных с натурным испытанием воздуховодов. Проведены экспериментальные исследования по оценке огнестойкости воздуховодов с различными типами огнезащиты. Кроме того, в рамках эксперимента проанализировано влияние особенностей элементов подвеса воздуховодов на их огнестойкость. На основании проведенных исследований сделан вывод о необходимости дальнейшего совершенствования средств огнезащиты для улучшения их эксплуатационных характеристик, так как наилучший результат показывают средства огнезащиты, имеющие дополнительные элементы и обеспечивающие целостность средств огнезащиты в процессе огневого воздействия. Также в результате испытаний была обоснована необходимость совершенствования нормативной документации, в частности методов испытаний воздуховодов, для возможности оценки монтажных элементов воздуховодов при испытаниях на огнестойкость.

Ключевые слова: воздуховоды систем дымоудаления, безопасная эвакуация, средства огнезащиты, противопожарное нормирование, эксплуатационные характеристики, огнестойкость.

ENSURING FIRE RESISTANCE OF AIR DUCTS OF SMOKE REMOVAL SYSTEMS WITH FIRE-PROOFRESISTANT COATINGS

Fedor A. PORTNOV, e-mail: portnovfa@mgsu.ru

Tatiana Yu. EREMINA, e-mail: ereminyu@mgsu.ru

Dmitrii A. KOROLCHENKO, e-mail: korolchenkoda@mgsu.ru

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

Abstract. An analysis of the state of the art of fire protection of air ducts of smoke exhaust systems in buildings and structures is given. The problem of insufficient knowledge of this issue is shown both from the theoretical side in terms of modeling the behavior of the air ducts under fire conditions, and from the practical aspects associated with full-scale testing of air ducts. Experimental studies have been carried out to assess the fire resistance of air ducts with various types of fire protection. In addition, as part of the experiment, the influence of the features of the suspension elements of air ducts on their fire resistance was analyzed. On the basis of the studies conducted, it was concluded that there is a need for further improvement of fire protection means to improve their operational characteristics, since the best result is shown by fire protection means with additional elements that ensure the integrity of the fire protection means during fire exposure. Also, as a result of the tests, the need to improve the regulatory documentation, in particular the test methods for air ducts, was substantiated in order to be able to assess the installation elements of air ducts during fire resistance tests.

Key words: air ducts of smoke removal systems, safe evacuation, fire protection equipment, fire-prevention rationing, operational characteristics, fire resistance.

Введение

Противопожарная безопасность в зданиях и сооружениях согласно нормативной документации России основывается на соблюдении условия возможности безопасной эвакуации людей из зданий до момента блокирования путей эвакуации опасными

факторами пожара. Их распространение приводит к блокированию путей эвакуации по причине ухудшения видимости в дыму, а также достижения критических значений концентрации токсичных продуктов термического разложения. Следует учитывать, что надежное функционирова-

ние систем дымоудаления и общеобменной вентиляции способствует снижению интенсивности распространения дыма, токсичных продуктов термического разложения и обеспечению безопасной эвакуации.

По статистике, большое количество пожаров происходит не-

Анализ огнезащитных покрытий для воздуховодов

| Средства огнезащиты | Предел огнестойкости / Приведенная толщина металла | Толщина сухого слоя, мм / Расход, кг/м ² |
|---|--|---|
| Огнезащитная краска «Steelmaster 60SB» | R90 | 1,4 / 3,7 |
| Огнезащитная система «СПРАМЕТ-160» в составе: огнезащитная краска «Декотерм-Р» | R45/ 3,4 | 0,87/ 1,48 |
| протекторно- алюминиевый слой | R90/ 5,8 | 1,75/2,95 |
| Система конструктивной огнезащиты: «Огракс-КСК-А» | R90/ 3,4 R120/ 3,4 | 2/4 2,8/5,6 |
| «Огракс-КСК» | R90/ 3,4 R120/ 3,4 | 0,9 /1,36 1,5 /2,27 |
| Огнезащитный теплоизоляционный состав ОФП-НВ «КРАТ» | EI 60 EI 90 EI 120 EI 150 EI 180 | 10/ 2,5 15±5/ 5 20±5/ 7,5 25±5/ 10 30±5/ 12,5 |

посредственно в системах вентиляции: число таких пожаров в России составляет до 20 % общего количества пожаров.

Причинами распространения опасных факторов пожара в системах дымоудаления становятся несоблюдение противопожарных требований по огнестойкости элементов систем, а также нарушение правил их монтажа и условий эксплуатации [1–9].

В состав инженерных систем дымоудаления, обеспечивающих пожарную безопасность зданий и сооружений, входят конструкции огнестойких воздуховодов различного функционального назначения и технического исполнения.

В исходном состоянии воздуховоды системы дымоудаления представляют собой конструкции из листовой стали, сварные, а также с элементами крепления, которые соединяются различными способами, например посредством фланцев. Воздуховоды могут размещаться в специальных нишах, по полу или с использованием специальных систем подвесов.

Известно, что конструкция, т. е.

элементы технологического оборудования с фактическим пределом огнестойкости, сохраняет свою несущую функцию в течение периода времени, необходимого для обеспечения безопасности:

$$R_f > R_{req},$$

где R_f – фактическое значение предела огнестойкости конструкции; R_{req} – нормируемое значение предела огнестойкости конструкции.

Очевидно, что без использования огнезащиты воздуховоды не обладают высокими пределами огнестойкости. В настоящее время разработано множество методов огнезащиты воздуховодов, основные из них: огнезащитные вспучивающиеся лакокрасочные покрытия и штукатурки; рулонные и плитные минераловатные материалы. Каждый из приведенных методов огнезащиты имеет ряд преимуществ и недостатков.

Выбор метода огнезащиты основывается на следующих факторах:

- требуемый предел огнестойкости;
- допустимая масса конструкции и средства огнезащиты;

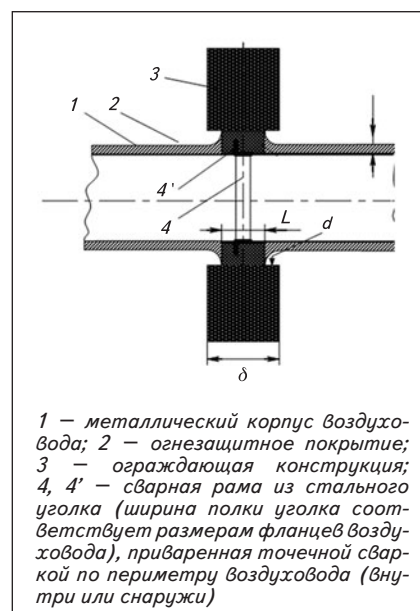


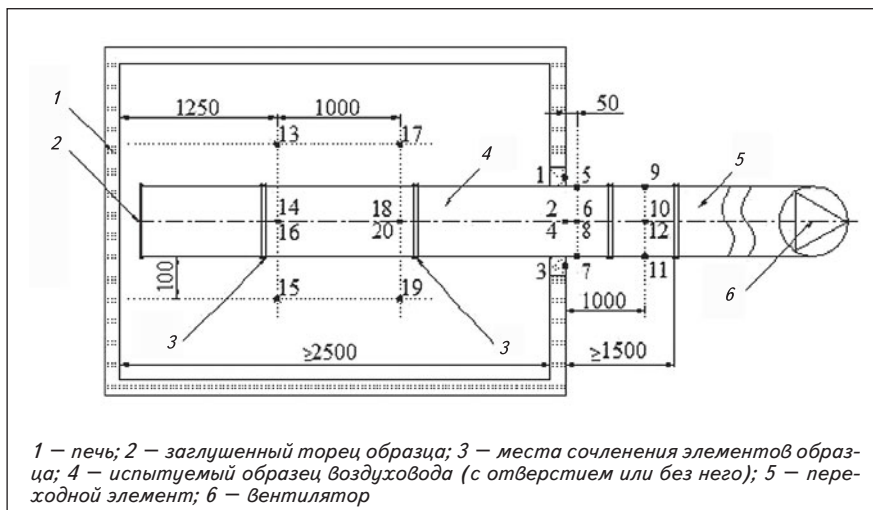
Рис. 1. Схема конструкции узла пересечения конструкций огнестойкими воздуховодами

- особенности расположения и удобства монтажа.

Примеры средств огнезащиты приведены в *таблице*.

Воздуховоды с нормируемыми пределами огнестойкости (в том числе теплозащитные и огнезащитные покрытия в составе их конструкций) должны быть из негорючих материалов. При этом толщину листовой стали для воздуховодов следует принимать расчетную, но не менее 0,8 мм. Элементы креплений (подвески) конструкций воздуховодов должны иметь пределы огнестойкости не менее нормируемых для воздуховодов (по установленным числовым значениям, но только по признаку потери несущей способности) в пределах обслуживаемого пожарного отсека и не менее нормируемых для строительных конструкций, к которым крепятся воздуховоды, за пределами обслуживаемого пожарного отсека.

При использовании различных типов огнезащиты следует учитывать конечную массу воздуховода после проведения огнезащитных работ, которая будет вос-



1 – печь; 2 – заглушенный торец образца; 3 – места сочленения элементов образца; 4 – испытуемый образец воздуховода (с отверстием или без него); 5 – переходной элемент; 6 – вентилятор

Рис. 2. Схема размещения горизонтальных воздуховодов на испытательном стенде

приниматься устройствами подвеса. При увеличении нагрузки возможно преждевременное разрушение подвесов при возникновении пожара.

За последние 25 лет появилось большое количество огнезащитных покрытий для воздуховодов, но поведение воздуховодов с огнезащитными покрытиями, в особенности узлов пересечения воздуховодами ограждающих строительных конструкций, в условиях пожара до сих пор не изучено [10–16].

Наибольшие проблемы вызваны тем, что конструкционные материалы огнезащиты и технологии их нанесения не обеспечивают огнестойкости некоторых

элементов и подвесов, узлов соединения отдельных частей и мест пересечения с конструкциями здания.

Особенности обработки огнезащитным покрытием с учетом схемы выполнения узлов пересечения воздуховодами ограждающих строительных конструкций приведены на рис. 1.

Для обеспечения надежной работы воздуховодов в условиях пожара необходимо проведение огневых испытаний по стандартным методикам.

Цель работы – оценка огнезащитных материалов для воздуховодов, а также монтажных элементов и креплений для воздуховодов.

В задачи работы входили натурные испытания воздуховодов, огнезащитных различными огнезащитными материалами, а также натурные испытания воздуховодов с использованием разных способов их подвеса.

Методы оценки и образцы для испытаний

В соответствии с ГОСТ Р 53299-2019 «Воздуховоды. Метод испытаний на огнестойкость» оценить огнестойкость воздуховода можно по следующим предельным состояниям:

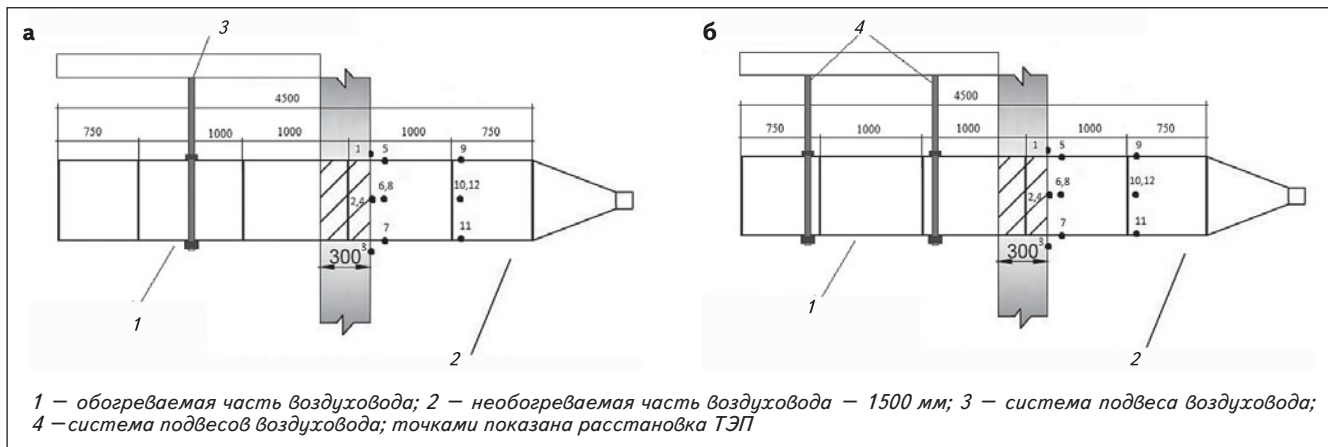
- потери теплоизолирующей способности, которая характеризуется повышением температуры на наружных необогреваемых поверхностях воздуховода и узлов уплотнения;
- потери плотности, вызывающей образование видимых трещин и зазоров в конструкции воздуховода, узлах уплотнения, а также превышение допустимых величин подсосов или утечек газа через неплотности конструкций воздуховодов.

В процессе испытаний в огневом пространстве создается температурный режим, отображаемый следующей зависимостью:

$$T - T_0 = 345 \cdot \lg(8t + 1),$$

где T – температура в печи, соответствующая времени t , °С; T_0 – температура

Рис. 3. Схемы размещения воздуховода с одним подвесом (а) и с двумя (б)



1 – обогреваемая часть воздуховода; 2 – необогреваемая часть воздуховода – 1500 мм; 3 – система подвеса воздуховода; 4 – система подвесов воздуховода; точками показана расстановка ТЭП

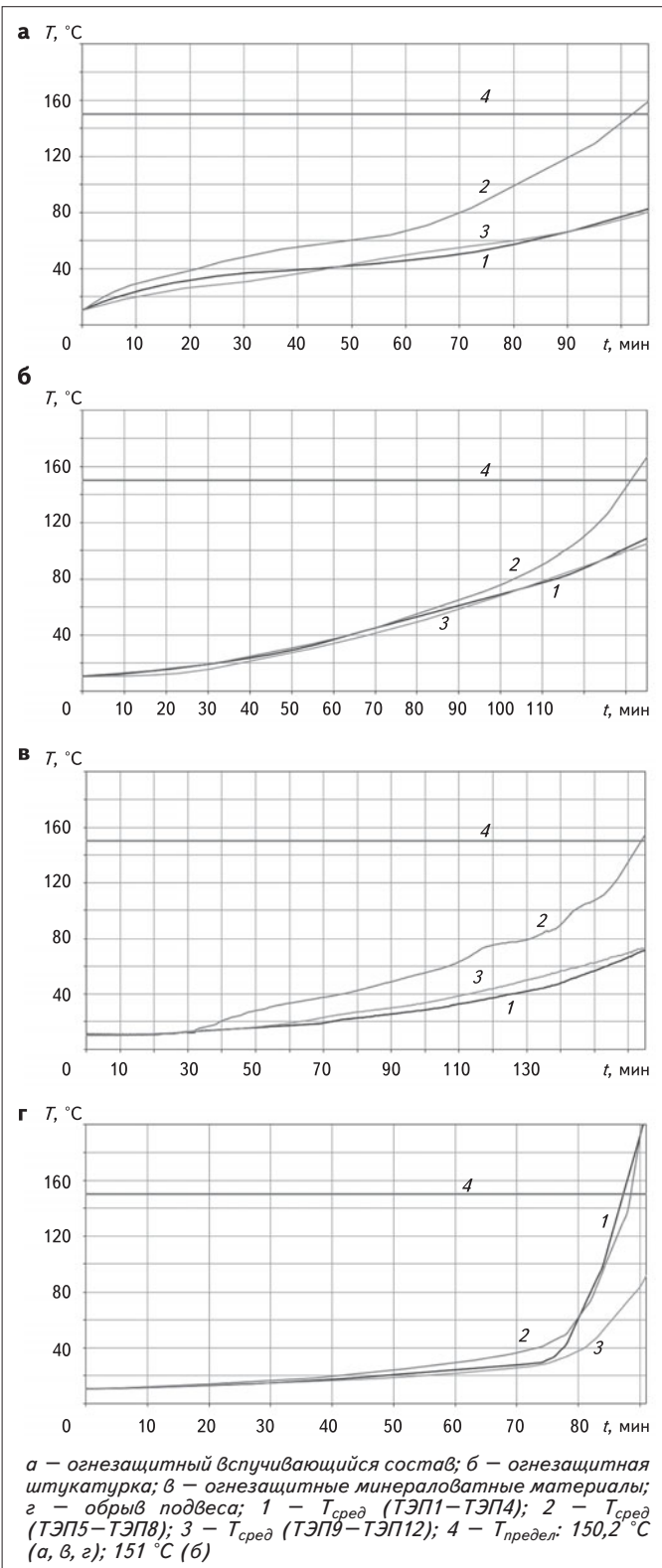


Рис. 4. Зависимость температуры $T_{\text{сред}}$ от времени теплового воздействия t на образце

в печи до начала теплового воздействия (принимают равной температуре окружающей среды), $^\circ\text{C}$; t – время, исчисляемое от начала испытания, мин.

Способ размещения горизонтальных воздухопроводов согласно ГОСТ Р 53299 показан на рис. 2.

Термопары (ТЭП), отмеченные точками (см. рис. 2), были установлены: 1–4 – на поверхности

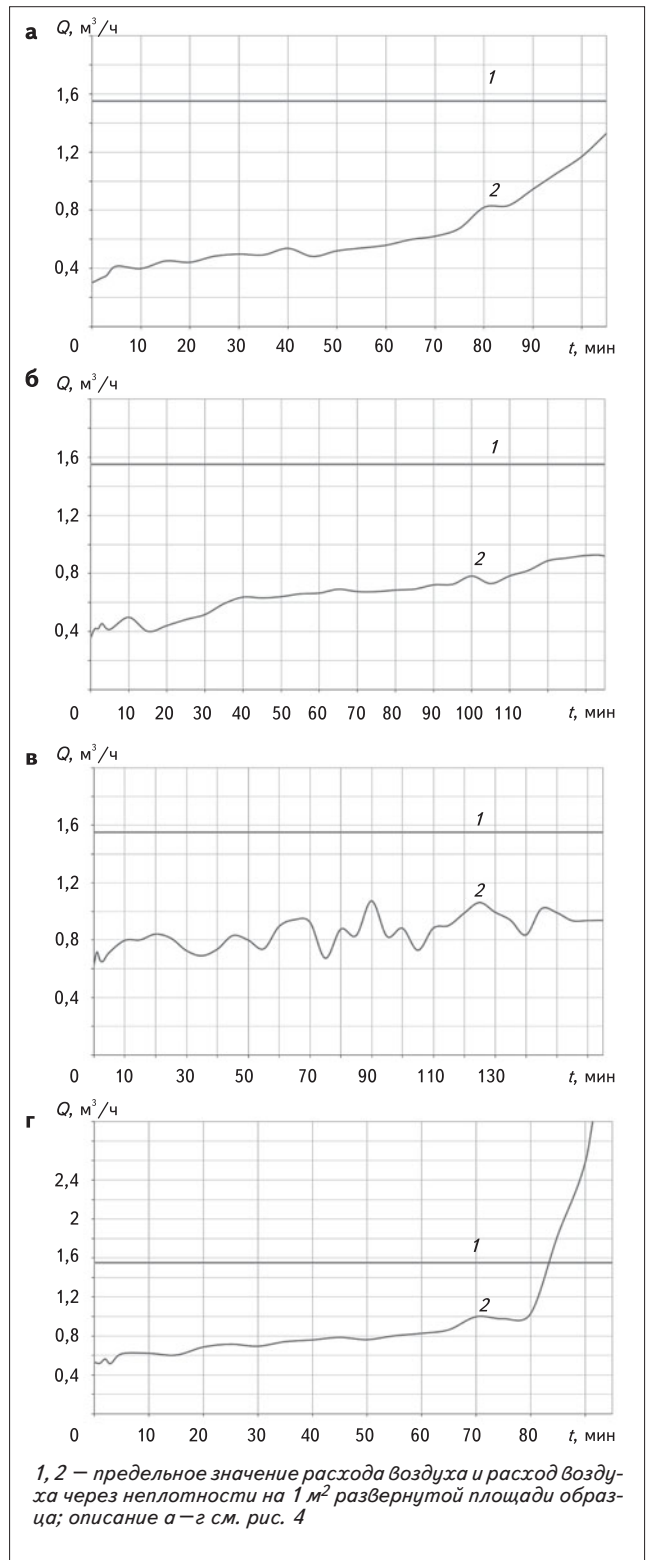


Рис. 5. Зависимость расхода воздуха Q (подсосов) на 1 м^2 развернутой площади образца от времени теплового воздействия t на образце

уплотнений воздуховода в проеме печи; 5–12 – на необогреваемых поверхностях воздуховода; 13–20 – в печи.

По окончании испытаний возможен визуальный осмотр испытуемого образца.

Образцы были прямоугольного сечения 900×600 мм, выполненные из оцинкованной стали толщиной 0,8 мм. Секции воздухопроводов между собой соединены с помощью фланцевых соединений, изготовленных из металлического уголка с размером полки 32 мм. Между собой фланцевые соединения скрепляются болтами с шайбами и гайками, длина болтов – 30 мм, диаметр – 10 мм. Воздуховод с двух сторон закрыт заглушками с отбортовкой 32 мм.

Для огнезащиты применяли следующие материалы:

- вспучивающееся лакокрасочное покрытие толщиной 2,2 мм;
- огнезащитную штукатурку толщиной 20 мм;
- маты минераловатные, кашированные алюминиевой фольгой, общей толщиной 50 мм.

Кроме того, для испытаний воздухопроводов с огнезащитными минераловатными матами было изготовлено несколько типов подвесов для оценки их поведения в условиях пожара. Схемы подвесов для воздухопроводов приведены на рис. 3 (точками показана расстановка ТЭП).

Результаты испытаний и их обсуждение

При испытании воздуховода, огнезащитного *вспучивающимся составом*, в процессе огневого воздействия отмечалось незначительное повышение температуры (рис. 4а), которое замедлилось в момент срабатывания огнезащитного состава (около 30 мин от начала огневого воздействия). На 60-й мин испытаний наблюдается рост температуры на воздуховоде в области

прохода через ограждающую конструкцию, что вызвано частичным разрушением вспученного слоя под воздействием высокой температуры.

Температуру измеряли термопары, которые были установлены: ТЭП1–ТЭП4 в местах прохода образца через ограждение печи; ТЭП5–ТЭП8 на необогреваемой поверхности образца на расстоянии 0,05 м от ограждения печи; ТЭП9–ТЭП12 на необогреваемой поверхности образца на расстоянии 1 м.

Частичное снижение дымогазонепроницаемости воздуховода (рис. 5а) происходит из-за разрушения огнезащитного слоя. Предельное состояние зафиксировано на 102-й мин от начала испытания.

Во время испытания *огнезащитной штукатурки*, нанесенной методом напыления, наблюдается высокая устойчивость воздуховода под воздействием повышенной температуры (рис. 4б). На 120-й мин от начала огневого воздействия происходит значительное повышение температуры, связанное с потерей эксплуатационных свойств штукатурки и ее осыпанием с воздуховода.

Однако в процессе испытаний не фиксируется снижения дымогазонепроницаемости воздуховода (рис. 5б).

При испытании воздухопроводов, огнезащитных *минераловатными материалами*, наблюдается длительный эффект огнезащиты (рис. 4в). Это связано в первую очередь с теплоизоляционными характеристиками выбранного метода огнезащиты, а также со способом монтажа средства огнезащиты. Крепление огнезащитного материала к воздуховоду осуществлено с помощью бандажей из стальной ленты шириной 25 мм. По окончании испытаний снижения дымогазонепроницаемости воздуховода

зафиксировано не было (рис. 5в).

В процессе вышеперечисленных испытаний использовался метод подвеса воздуховода по схеме (см. рис. 3б) с использованием двух подвесов из стальных шпилек и траверс, огнезащитных минераловатными материалами. Отмечалась деформация систем подвеса, что не повлияло на результаты.

В случае подвеса воздуховода по схеме, приведенной на рис. 3а (один подвес), наблюдается следующая картина: на 80-й мин испытаний происходит обрыв подвеса с обрушением воздуховода, что приводит к его вскрытию и, соответственно, прониканию горячих газов через образовавшийся проем с повышением температуры в контрольных точках (рис. 4г) и потере дымогазонепроницаемости воздуховода (рис. 5г).

Выводы

1. Несмотря на существование большого количества разновидностей огнезащиты для воздухопроводов, поведение воздухопроводов с огнезащитными покрытиями, в особенности узлов пересечения воздуховодами ограждающих строительных конструкций, в натуральных условиях пожара остается малоизученным.

2. Выбранные методы огнезащиты достаточно высокоэффективны, но требуют большего изучения в связи с возможным длительным пребыванием в условиях пожара и резким снижением огнезащитной эффективности при потере или ослаблении их эксплуатационных характеристик. Большой интерес представляют системы огнезащиты, включающие в себя монтажные элементы, которые обеспечивают длительное сохранение эксплуатационных свойств.

3. Важное значение имеют элементы подвеса воздухопроводов.

Для них отсутствуют требования в нормативной документации на проведение огневых испытаний, что приводит к необходимости актуализации данных методов.

4. Огневые испытания по стандартным методикам позволяют не только оценить сохранение

функционального назначения воздуховода, но и провести детальный анализ поведения средства огнезащиты, а также элементов воздуховода и их пересечения с различными конструкциями здания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект «Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз» № FSWG-2020-0007).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирилов А. Э., Черный К. А. Модель оценки пожарной безопасности путей эвакуации производственных помещений и зданий // Газовая промышленность. 2018. № 9(774). С. 120–124
2. Русских Д. В., Вытовтов А. В., Шевцов С. А. Особенности процесса эвакуации людей из производственного помещения при пожаре // Техносферная безопасность. 2019. № 1(22). С. 70–82.
3. Холщевников В. В., Присадков В. И., Потемкина О. В. [и др.]. Основные направления совершенствования методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках на основе стохастических представлений и деревьев событий // Пожарная и аварийная безопасность: сб. материалов XI Междунар. науч.-практ. конф., посвященной Году пожарной охраны (24–25 ноября 2016 г., Иваново). Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2016. С. 189–194.
4. Колосова Н. В., Кузнецова Г. А. Методика расчета противодымной вытяжной вентиляции // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Высокие технологии. Экология. 2017. № 1. С. 97–103.
5. Wahlqvist J., Hees P. Evaluating methods for preventing smoke spread through ventilation systems using fire dynamics simulator [Оценка методов предотвращения распространения дыма через вентиляционные системы с использованием симуляции пожара] // Fire and Materials. 2017. No. 41(6). Pp. 625–645.
6. Cheng L. H., Ueng T. H., Liu C. W. Simulation of ventilation and fire in the underground facilities [Моделирование вентиляции и пожаротушения в подземных сооружениях] // Fire Safety Journal. 2001. No. 36(6). Pp. 597–619.
7. Kecel S. Design of ventilation systems and fire scenarios in mines and establishing the safety zone with analysis of escape routes [Проектирование вентиляционных систем и сценариев пожаров в шахтах и установление зоны безопасности с анализом путей эвакуации] // Heat Transfer Research. 2018. No. 49(3). Pp. 219–233.
8. Barbato L., Cascetta F., Rotondo G. Fire safety investigation for road tunnel ventilation systems [Исследование пожарной безопасности вентиляционных систем автодорожных тоннелей] // Tunneling and Underground Space Technology. 2014. No. 43. Pp. 253–265.
9. Kashef A., Benichou N. Investigation of the performance of emergency ventilation strategies in the event of fires in a road tunnel [Исследование эффективности стратегий аварийной вентиляции в случае пожаров в автодорожном тоннеле] // Journal of Fire Protection Engineering. 2018. No. 18(3). Pp. 165–198.
10. Динь К. Х. Пожаробезопасность воздуховодов систем противодымной защиты во Вьетнаме // European Journal of Technical and Natural Sciences. 2019. № 1. С. 19–23.
11. Колчев Б. Б., Вислогузов П. А., Беляев Д. В. Огнестойкие воздуховоды систем вентиляции и кондиционирования // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций: сб. статей по материалам VI Всерос. науч.-практ. конф. (27 мая 2016 г., Железногорск). Железногорск : Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2016. С. 83–88.
12. Колчев Б. Б., Вислогузов П. А., Беляев Д. В. Огнестойкие воздуховоды систем вентиляции и кондиционирования // Охрана труда и техника безопасности на промышленных предприятиях. 2017. № 3. С. 24–29.
13. Филимонов В. П. Материалы для пассивной огнезащиты строительных конструкций // Строительные материалы. 2006. № 4. С. 28–29.
14. Королева Т. И., Ивачев М. А., Матюшин И. Н. Огнезащитная обработка воздуховодов систем дымоудаления // Проблемы энергосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах: сб. статей XXI Междунар. науч.-практ. конф. (28–29 апреля 2020 г., Пенза). Пенза : Приволжский Дом знаний, 2020. С. 57–61.
15. Расулова А. В. Огнезащита вентиляционных воздуховодов // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (24–27 апреля 2017 г., Тюмень). Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2017. С. 277–279.
16. Колчев Б. Б., Вислогузов П. А., Беляев Д. В., Чистова Т. И. Модернизация отечественных методов испытаний на огнестойкость инженерного оборудования систем вентиляции и кондиционирования // Пожарная безопасность. 2016. № 3. С. 106–111.

REFERENCES

1. Kirilov A. E., Chernyy K. A. Model of the fire safety assessment of evacuation ways of industrial premises and buildings. *Gazovaya promyshlennost'*, 2018, no. 9(774), pp. 120–124. (In Russian).
2. Russkikh D. V., Vytovtov A. V., Shevtsov S. A. The features of the process of evacuation of people from the production room in case of fire. *Tekhnosfernaya bezopasnost'*, 2019, no. 1(22), pp. 70–82. (In Russian).
3. Kholshchevnikov V. V., Prasadkov V. I., Potemkina O. V. et al. Main trends improvement of methods for determining calculated value of the fire risk in buildings and fire compartments based on stochastic representations and trees events. *Pozharnaya i avariynaya bezopasnost'* [Fire and emergency safety]. Sb. materialov XI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy Godu pozharney okhrany, November 24–25, 2016. Ivanovo, 2016, pp. 189–194. (In Russian).
4. Kolosova N. V., Kuznetsova G. A. Methodology of calculating anti-air exhaust ventilation. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Vysokie tekhnologii. Ekologiya*, 2017, no. 1, pp. 97–103. (In Russian).
5. Wahlqvist J., Hees P. Evaluating methods for preventing smoke spread through ventilation systems using fire dynamics simulator. *Fire and Materials*, 2017, no. 41(6), pp. 625–645.
6. Cheng L. H., Ueng T. H., Liu C. W. Simulation of ventilation and fire in the underground facilities. *Fire Safety Journal*, 2001, no. 36(6), pp. 597–619.
7. Kecel S. Design of ventilation systems and fire scenarios in mines and establishing the safety zone with analysis of escape routes. *Heat Transfer Research*, 2018, no. 49(3), pp. 219–233.
8. Barbato L., Cascetta F., Rotondo G. Fire safety investigation for road tunnel ventilation systems. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, no. 43, pp. 253–265.
9. Kashef A., Benichou N. Investigation of the performance of emergency ventilation strategies in the event of fires in a road tunnel. *Journal of Fire Protection Engineering*, 2008, no. 18(3), pp. 165–198.
10. Dinh C. H. Fire safety of duct in smoke protection systems in Vietnam. *European Journal of Technical and Natural Sciences*, 2019, no. 1, pp. 19–23.
11. Kolchev B. B., Visloguzov P. A., Belyaev D. V. Fire-resistant air ducts of ventilation and air conditioning systems. *Monitoring, modelirovanie i prognozirovaniye opasnykh prirodnykh yavleniy i chrezvychaynykh situatsiy* [Monitoring, modeling and forecasting of natural hazards and emergencies]. Sb. statey po materialam VI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, May 27, 2016. Zheleznogorsk, 2016, pp. 83–88. (In Russian).
12. Kolchev B. B., Visloguzov P. A., Belyaev D. V. Fire-resistant ducts of ventilation and air conditioning systems. *Okhrana truda i tekhnika bezopasnosti na promyshlennykh predpriyatiyakh*, 2017, no. 3, pp. 24–29. (In Russian).
13. Filimonov V. P. Materials for passive fire protection of building structures. *Stroitel'nye materialy*, 2006, no. 4, pp. 28–29. (In Russian).
14. Koroleva T. I., Ivachev M. A., Matyushin I. N. Fire-retardant treatment of air ducts of smoke removal systems. *Problemy energosberezheniya v promyshlennom i zhilishchno-kommunal'nom kompleksakh* [Problems of energy saving in industrial and housing and communal complexes]. Sb. statey XXI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, April 28–29, 2020. Penza, Privolzhskiy Dom znaniy Publ., 2020, pp. 57–61. (In Russian).
15. Rasulova A. V. Fire protection of ventilation ducts. *Novye tekhnologii – neftegazovomu regionu* [New technologies – oil and gas region]. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, April 24–28, 2017. Tyumen, 2017, pp. 277–279. (In Russian).
16. Kolchev B. B., Visloguzov P. A., Belyaev D. V., Chistova T. I. Improvement of domestic fire resistance test methods for technical equipment of ventilation and air conditioning systems. *Pozharnaya bezopasnost'*, 2016, no. 3, pp. 106–111. (In Russian).

Для цитирования: Портнов Ф. А., Еремина Т. Ю., Корольченко Д. А. Обеспечение огнестойкости воздуховодов систем дымоудаления с огнезащитными покрытиями // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 9. С. 24–30. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.24-30.

For citation: Portnov F. A., Eremina T. Yu., Korolchenko D. A. Ensuring Fire Resistance of Air Ducts of Smoke Removal Systems with Fire-Proofresistant Coatings. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo* [Industrial and Civil Engineering], 2021, no. 9, pp. 24–30. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.24-30. ■

ЖУРНАЛ «ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»

ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ ВАК, В БАЗЫ ДАННЫХ ELIBRARY.RU,
RSCI НА ПЛАТФОРМЕ WEB OF SCIENCE И ДР.

Интеграция железнодорожного транспорта в интермодальную транспортную систему города

Денис Николаевич ВЛАСОВ^{1,2}, доктор технических наук, e-mail: vlasovdn@mgsu.ru

¹ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

² ГАУ «Научно-исследовательский и проектный институт Генерального плана Москвы», 125047 Москва, 2-я Брестская ул., 2/14

Аннотация. Рассмотрены вопросы трансформации железнодорожного транспорта и его интеграции в систему пассажирского транспорта города. В мировой практике накоплен богатый опыт изменения железнодорожного транспорта из региональной транспортной системы, обеспечивающей эпизодические поездки жителей пригорода в город, в эффективную систему, которая формирует транспортный каркас агломерации и способствует ежедневным перемещениям жителей со всеми целями. Один из основных способов соединения разрозненных, радиальных железнодорожных направлений в единую систему – строительство линий, объединяющих их в диаметры. Планировочное развитие железной дороги в условиях сложившейся плотной городской застройки, нередко насыщенной памятниками архитектуры, озелененными территориями общего пользования, невозможно без решения вопроса о внеуличной трассировке линий. Прохождение линий железной дороги на эстакаде через центр города может быть в крайне редких, исключительных случаях. Тоннельное прохождение – это более дорогая, но наиболее эффективная альтернатива. Приведены основные системы, реализованные в мировой практике. Выполнен сравнительный анализ показателей систем и рассмотрены факторы, которые (с учетом отечественной специфики) могут быть использованы при разработке нормативных рекомендаций по планированию развития железнодорожного транспорта в крупнейших городах России. Проведен регрессионный анализ систем с целью определения действующих факторов. Предложены номограммы, использование которых возможно при долгосрочном планировании. Данный метод апробирован на примере Москвы. Изложены практически значимые рекомендации по дальнейшему развитию проекта Московских центральных диаметров и Московского центрального кольца.

Ключевые слова: железная дорога, пригородно-городское сообщество, пассажирский транспорт, генеральный план города, тоннели, агломерация.

INTEGRATION OF RAILWAY TRANSPORT INTO THE INTERMODAL TRANSPORT SYSTEM OF THE CITY

Denis N. VLASOV^{1,2}, e-mail: vlasovdn@mgsu.ru

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

² Research and Project Institute of General Planning for the City of Moscow, 2-ya Brestskaya ul., 2/14, Moscow 125047, Russian Federation

Abstract. The article deals with the transformation of railway transport and its integration into the city's passenger transport system. In world practice, a wealth of experience has been accumulated in changing railway transport from a regional transport system that provides occasional trips of suburban residents to the city into an effective system that forms the transport framework of the agglomeration, ensuring the daily movement of residents for all purposes. One of the main ways to connect disparate, radial railway lines into a unified system is the construction of lines that combine them in diameters. The planning development of the railway in the conditions of the existing dense urban development, often full of architectural monuments, green areas of public use, is not possible without solving the issue of off-street routing of lines. The passage of railway lines on an overpass through the city center is possible in extremely rare, exceptional cases. Tunneling is the more expensive but most efficient alternative. The main systems implemented in world practice are given. A comparative analysis of the indicators of systems is carried out and factors are considered that (taking into account the national specifics) can be used in the development of regulatory recommendations for planning the development of railway transport in the largest cities of the Russian Federation. The regression analysis of the systems was carried out in order to determine the acting factors. Nomograms are proposed, the use of which is possible in long-term planning. The proposed method was approbated on the example of Moscow. Practically significant recommendations are given for the further development of the project of the Moscow Central Diameters and the Moscow Central Ring.

Key words: railway, suburban-urban communication, passenger transport, master plan of city, tunnels, agglomeration.

Введение

Пригородно-городская железная дорога – один из элементов системы скоростного внеулично-

го транспорта, обеспечивающего связанность и доступность территории города с его пригородами. Наряду с региональными и

межрегиональными системами эта дорога входит в состав пассажирского комплекса железной дороги [1].

В отечественной практике распространенное название пригородно-городских железнодорожных перевозок — электричка. В мировой практике используются различные термины: S-Bahn (Германия, Австрия и др.), Commuter Rail (США, Великобритания, Юго-Восточная Азия и пр.), RER (Франция) и т. д. В зарубежной литературе чаще всего для обозначения линий пригородно-городской железной дороги применяют термин Commuter Rail [2–6].

Основное отличие пригородно-городских перевозок от региональных состоит в дальности распространения сервиса. При этом часто используются одни и те же железнодорожные пути (деля их с межрегиональными пассажирскими или грузовыми поездами) и схожий подвижной состав.

От городской системы метрополитена (помимо зоны обслуживания) технические отличия более существенны [7, 8]:

- наземное и надземное прохождение линий;
- верхний токосяем (за исключением линий S-Bahn в Берлине и Мюнхене);
- большее количество сидячих мест (в связи с большим временем обслуживания пассажира);
- более низкая частота обслуживания и наличие расписания движения.

Разнится и роль системы пригородно-городской железной дороги в транспортном обслуживании территорий городов. Так, например, в Гамбурге S-Bahn — значимая часть городского пассажирского транспорта (что связано с высокой частотой движения на линиях и развитой сетью), но не имеет большого значения

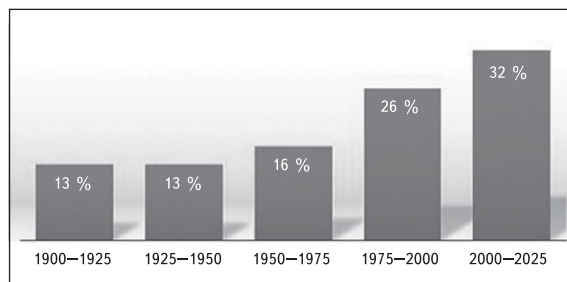


Рис. 1. Распределение подземных участков пригородно-городской железной дороги по годам начала эксплуатации тоннельных участков

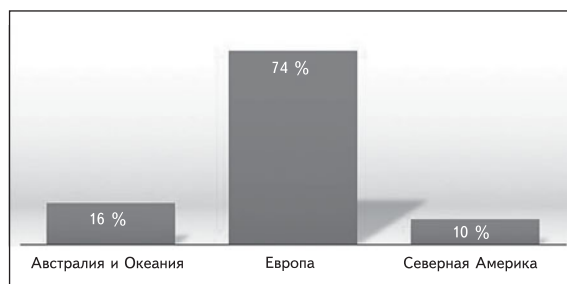


Рис. 2. Распределение подземных участков пригородно-городской железной дороги по континентам, на которых размещены рассматриваемые системы

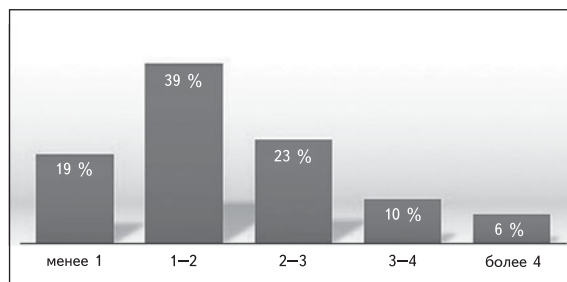


Рис. 3. Распределение расстояний, км, между станциями на подземных участках пригородно-городских железных дорог

для пригородных перевозок (в отличие от систем Берлина и Ганновера).

Мировая практика интеграции железной дороги в систему городского транспорта, создания единых агломерационных транспортных систем весьма обширна и содержит целый набор различных мероприятий. Свою эффективность показала организация единых направлений, обычно включающих два или более радиальных направления, которые соединяются между собой через центральную часть города. Для объединения разрозненных час-

тей используются различные планировочные и технические приемы: включение в систему пассажирского движения грузовых железнодорожных веток (вплоть до подъездных веток к крупным предприятиям), строительство новых наземных и надземных участков железной дороги и др.

Практически во всех городах России сервис пригородно-городских железных дорог слабо интегрирован в систему городских перевозок. Складывается впечатление, что основная задача сервиса — обеспечение поездок с рекреационными целями (на дачу или просто на природу) в пятницу и выходные дни. К характерным особенностям электричек можно отнести:

- значительную неравномерность в интервалах движения даже в «пиковые» часы;
- наличие дневного перерыва в движении поездов;
- низкую скорость движения по территории городов и т. д., и т. п.

В последнее время в Москве ситуация значительно изменилась. Теоретические

проекты интеграции железнодорожных линий между собой и в систему городского пассажирского транспорта (так называемые глубокие вводы) сменились практикой реализации проектов Московского центрального кольца (МЦК) и Московских центральных диаметров (МЦД). Вместе с тем уже сейчас очевидно, что дальнейшее развитие железной дороги как вида городского или агломерационного транспорта в Москве в частности и в России в целом сопряжено со строительством тоннельных участков [9, 10].

Обзор отечественного и зарубежного опыта

В рамках настоящего исследования были рассмотрены зарубежные примеры планировочного развития железнодорожного транспорта с использованием тоннельных участков (Underground Commuter Rail). Всего было изучено более 30 систем.

Помимо реализованных проектов в ряде городов предполагается строительство подземных железнодорожных линий: Дублин (Ирландия), Глазго (Великобритания), Базель (Швейцария), Будапешт (Венгрия), Бостон (США), Прага (Чехия) и др. Прорабатываются вопросы дальнейшего развития сети в городах: Сидней и Мельбурн – Melbourne Metro 2 (Австралия), Сан-Франциско и Нью-Йорк – East Side Access (США), Хельсинки – Helsinki City Rail Loop (Финляндия), Мюнхен – Trunk Line 2, Штутгарт, Берлин (Германия). Ведется строительство новых тоннельных участков в Гётеборге – West Link (Швеция).

В исследовании была проведена аналитическая обработка и обобщение по всем рассмотренным системам и выполнены статистические расчеты с целью установления закономерностей в мировых тенденциях развития тоннельных сооружений на региональных железнодорожных линиях.

Тоннельные участки стали появляться на линиях городской железной дороги в период, когда бурное развитие и индустриализация городов совпали с не менее бурным развитием железной дороги в начале XX в. Впервые подобные решения появились в Лондоне (1904 г.) и в Сан-Франциско (1907 г.). Сдерживающим фактором стали трудности с обеспечением режима проветривания (с учетом использования паровой и тепловозной тяги) тоннелей и сложность технических

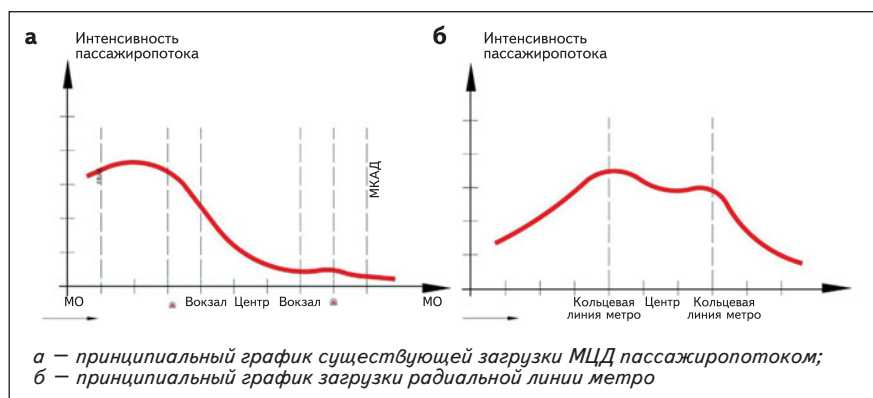


Рис. 4. Принципиальные схемы распределения пассажиропотоков в Московском метрополитене и на радиальных направлениях железных дорог Москвы

Сравнительные характеристики Московского метрополитена и железнодорожного транспорта в границах Москвы

| Показатель | Московский метрополитен | Железная дорога |
|---|-------------------------|-----------------|
| Линии, шт. | 15 | 10 |
| Станции, шт. | 233 | 104 |
| Протяженность линий, км | 408,1 | 262 |
| Интервал движения в час «пик», мин | 1,5 | 6,3 |
| Количество перевезенных пассажиров в 2019 г., млрд пас./год | 2,56 | 0,7 |

Примечание. Показатели приведены на 01.01.2020 г. по отчетным данным Департамента транспорта и развития дорожно-транспортной инфраструктуры Москвы и ОАО «РЖД». Показатели метрополитена даны без учета Московского монорельса, а железной дороги – без учета МЦК и участка Большого железнодорожного кольца (проходит по Новой Москве).

решений. Развитие технологий и обусловило появление более половины из подобных участков в последней четверти XX в. и в первой четверти XXI в. (рис. 1).

Подземные участки пригородно-городских железных дорог построены на всех континентах за исключением Африки. В Южной Америке ведутся активные работы по строительству подобных линий. Более 70 % общего количества таких линий расположены на европейском континенте, интенсивно развиваются данные системы в Австралии и Океании (рис. 2).

Практически в составе всех линий расположены станции для обслуживания пассажиров. Более чем в 50 % случаев расстоя-

ние между станциями не превышает 2 км. Анализ распределения дальностей между станциями представлен на рис. 3.

В России наиболее обширный опыт развития и интеграции железнодорожного транспорта в городскую транспортную систему накоплен в Москве. Реализован проект МЦК, осуществляется проект МЦД. Как показывают отчеты специалистов, доля железнодорожного транспорта в городских перевозках в Москве составляет порядка 10–12 % (при этом необходимо учитывать, что зона влияния железной дороги намного больше). Показатели развития сети железнодорожного транспорта сравнимы с Московским метрополитеном (см.

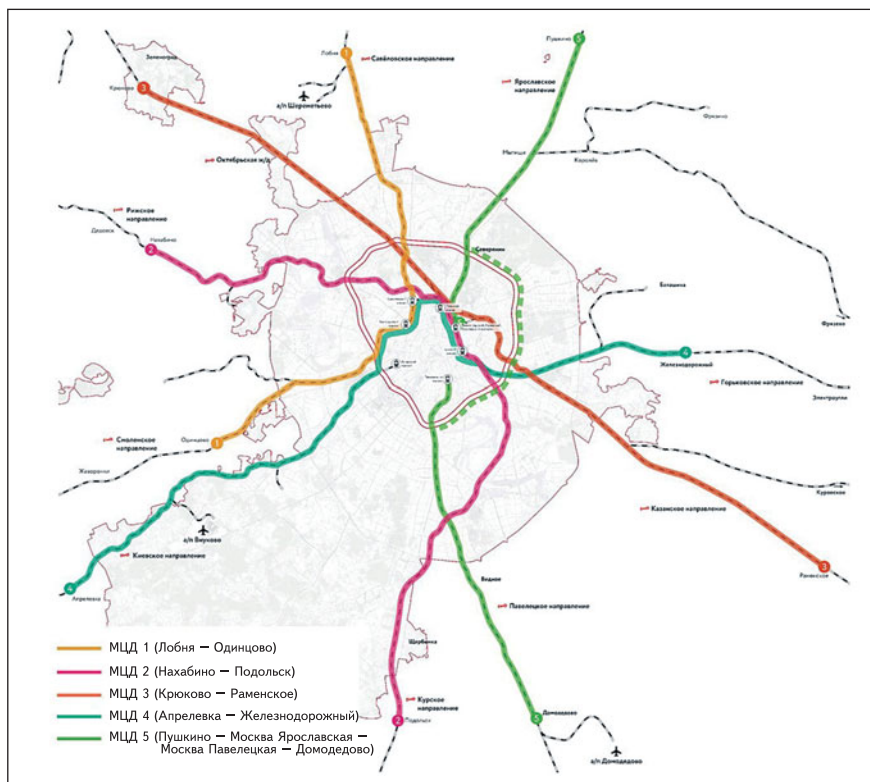


Рис. 5. Схема первоочередных Московских центральных диаметров

таблицу), что говорит о значительном потенциале железной дороги как вида городского (агломерационного) транспорта.

Интересно сравнить между собой типовые графики загрузки пассажирами радиальных направлений железной дороги и метрополитена (рис. 4). Максимальные показатели по наполнению пассажирами подвижного состава железной дороги отмечаются на перегонах от Московской кольцевой автомобильной дороги до первой станции метрополитена, затем загрузка вагонов обычно значительно снижается, и фактически поезда перевозят не пассажиров, а воздух.

В Московской агломерации интенсивно развивается проект создания МЦД. Суть данного проекта состоит в объединении радиальных направлений железной дороги между собой и образовании системы сквозных железнодорожных направлений, проходящих через центр города

(рис. 5). Московские диаметры — продолжение успешного проекта МЦК, движение по которому было запущено в 2016 г., и за первый полный год работы (2017 г.) перевезено более 110 млн пассажиров; в 2018 г. — порядка 130 млн пассажиров. Проект МЦД представляет собой соединение радиальных направлений через существующие и достаточно разветвленные железнодорожные пути, которые проходят по центру Москвы. Исключение составляют: четвертый диаметр, для его реализации строится железнодорожная эстакада от Киевского направления Московской железной дороги (МЖД) в сторону Белорусского вокзала; и пятый диаметр, который пока не будет замкнут через центр города.

В ноябре 2019 г. было запущено движение по МЦД 1 и 2. Развитие необходимой железнодорожной инфраструктуры должно завершиться до 2022 г. Кроме

того, будут обеспечены доступность остановочных пунктов, соблюдены условия безопасного движения пешеходов и транспорта. Для реализации указанных подходов необходимо строительство новых главных путей, реконструкция станций и остановочных пунктов с устройством внеуличных пешеходных конкорсов, сооружение внеуличных пешеходных переходов на перегонах и транспортных пересечений в разных уровнях, благоустройство подходов и прилегающих территорий и пр.

Работы по организации движения по МЦД 3, 4 и 5 в настоящее время уже начаты. Организация движения планируется в 2024–2025 гг.

Возможные направления дальнейшего развития проекта МЦД:

- организация маршрутного движения по центральным диаметрам;
- увеличение частоты движения;
- формирование новых направлений.

Реализация этих мероприятий с использованием существующей инфраструктуры практически невозможна. В этой связи одним из направлений планировочного развития железнодорожного транспорта Московской агломерации может быть устройство внеуличных участков линий (тоннельные и эстакадные), причем, если говорить о центре Москвы, то эти участки обязательно должны быть тоннельными (по очевидным причинам).

Теория и расчеты

Собранная информация по существующим тоннелям, используемым для интеграции железной дороги в транспортную систему города, позволила выполнить анализ исходных данных для определения закономерностей в развитии подобных систем. В ходе исследования были проанализированы и соотнесены

ми участками железной дороги (рис. 6).

Исходя из полученных зависимостей и номограмм определим потребность Москвы в развитии тоннельных участков железной дороги. Для расчетов используем официальные статистические данные и расчеты ГАУ «Генплан Москвы». Численность населения 12,6 млн человек, площадь территории в официальных границах — 2,5 тыс. км², оценочная площадь Московской агломерации — 5,8 тыс. км².

Проведенные расчеты показали, что в соответствии с мировыми тенденциями протяженность тоннельных участков должна составлять 2–3,9 км, а количество станций — три-четыре. Ниже рассмотрим несколько закономерностей, полученных для других агломераций, но действующих и для Москвы.

Результаты расчетов и обсуждение

В 2018–2019 гг. Институтом Генерального плана Москвы по заказу Московского комитета по архитектуре и градостроительству разрабатывалась «Концепция развития Московского железнодорожного узла». В работе участвовал широкий круг специалистов из различных организаций, включая: РУТ (МИИТ), Центр экономики инфраструктуры, ВШЭ, специализированные проектные институты ОАО «РЖД» и др. Одним из направлений концепции было определение перспектив развития Московских центральных диаметров. Состоялись конференции и семинары, посвященные данному вопросу. В рамках одного из мероприятий были рассмотре-

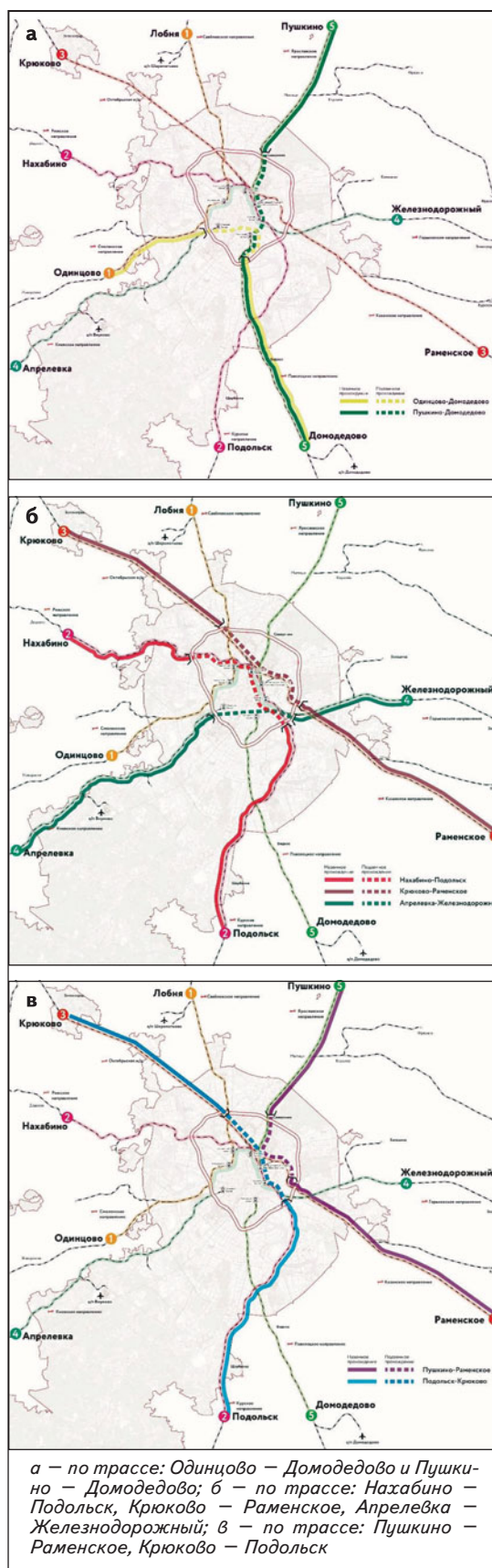


Рис. 7. Варианты трассировки тоннельных участков

ны предложения участников о перспективах развития проекта МЦД после 2025 г. В частности, предполагалось сооружение следующих участков:

- тоннель по трассе, объединяющий Ярославское и Павелецкое направления (фактически речь идет о соединении МЦД 5 через центр города);
- тоннель по трассе, соединяющей Каланчевскую пл. с Курским вокзалом (трассы МЦД 2 и 4 — Алексеевская ветка). Указанный участок — один из самых загруженных на территории Москвы. Через него проходят пригородные электропоезда, поезда дальнего следования, МЦД, транзитные поезда дальнего следования, а в перспективе и поезда высокоскоростного сообщения;
- тоннель, спрямляющий МЦД 4 (Киевское — Казанское направления) через центр города.

Рассматривались и другие варианты (рис. 7). Было представлено семь возможных направлений тоннелей (глубокие вводы) в Москве. Кроме того, как отдельный вариант обсуждалась интеграция тоннельных участков между собой для обеспечения возможности организации маршрутного движения по МЦД.

По мнению участников семинаров, наиболее востребованы тоннели, которые обеспечивают замыкание МЦД 5 (Пушкино — Домодедово) и повышение пропускной способности Алексеевской ветки. Все специалисты отметили технические сложности данных проектов, связанные с большой глубиной заложения всех рассматриваемых вариантов тонн-

нельных участков железной дороги (по оценкам, глубина заложения составит порядка 80–100 м), а также трудности, вызванные строительством в центральной части города, и высокую стоимость реализации подобных проектов.

Выводы

Анализ реализованных и реализуемых проектов позволил установить основные мировые тенденции в развитии подземных сооружений при интеграции пригородно-городской железной дороги в систему городского пассажирского транспорта.

1. Глубокая интеграция пригородно-городского транспорта и скоростного внеуличного транспорта города с созданием единой системы (Сеул, Токио), а также включение тоннельных участков железной дороги в линии метрополитена в Сиднее — Epping to Chatswood Rail Link входит в Sydney 49Metro и в метро в Лозанне.

2. Строительство выделенных

железнодорожных линий для обеспечения подъезда к аэропортам и крупным транспортным узлам (Перт — Forrestfield — Airport Link, Австралия) и новая линия в аэропорт Франкфурта.

3. Фактически все новые линии, проходящие через города, строятся с использованием тоннелей глубокого заложения в отличие от линий, построенных в начале — середине XX в.

4. Высокая стоимость проектов и несоблюдение заявленных сроков реализации. Открытие приурочивается к крупным международным событиям, и обычно подобные проекты входят в число приоритетных национальных и международных проектов.

5. Планировочные характеристики зависят от функционально-планировочной организации территории города и решаемых системой задач. Вместе с тем установлена зависимость между протяженностью тоннельных участков и количеством станций, расположенных на них. Анализ мирового

опыта показывает, что среднее расстояние между станциями на тоннельных участках железной дороги составляет около 2 км.

6. Проведенные расчеты и анализ мирового опыта показали, что невозможно рассчитать стандартные (нормируемые) удельные показатели для оценки протяженности (плотность, количество километров на число жителей и др.) тоннельных участков железных дорог в городской транспортной инфраструктуре. Однако для оценки потенциальной необходимости в тоннельных участках в составе системы железнодорожного транспорта города можно использовать две номограммы, показывающие отношение количества жителей и площади поселения к протяженности тоннельных участков.

7. Проектные семинары, проведенные в институте Генерального плана Москвы, позволили определить возможные направления для строительства тоннельных участков железной дороги в Москве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эпоха агломераций. Городская экономика, пространство и политика в новом масштабе. М. : Альпина нон-фикшн, 2018. 624 с.
2. Большой Лондон.
URL: <https://www.london.gov.uk/> (дата обращения: 16.06.2021).
3. Проект Кроссрейл.
URL: <https://www.crossrail.co.uk/> (дата обращения: 16.06.2021).
4. Регион Мадрид.
URL: <https://www.comunidad.madrid/servicios/salud/informe-estado-salud-poblacion> (дата обращения: 16.06.2021).
5. Региональный транспортный консорциум Мадрида.
URL: <https://www.crtm.es/tu-transporte-publico> (дата обращения: 19.07.2021).
6. Мэрия Буэнос-Айреса.
URL: <https://www.buenosaires.gob.ar/rer/sistema> (дата обращения: 19.07.2021).
7. Власов Д. Н. Принципы застройки, ориентированные на массовые виды транспорта, в планировании зарубежных пересадочных узлов // Архитектура и строительство России. 2015. № 8(212). С. 20–29.
8. Власов Д. Н. Городские транспортные системы и развитие интермодальных перевозок // Мир транспорта. 2016. Т. 14. № 5(66). С. 130–139.
9. Департамент транспорта Москвы.
URL: https://transport.mos.ru/common/upload/docs/1500303522_4.2.CarlosChristobalPinto_RUS4k3.pdf (дата обращения: 19.07.2021).
10. The Chartered Institute of Building (CIOB) [Сертифицированный институт строительства].
URL: <http://www.globalconstructionreview.com/news/argentina-launches-23bn-ppp-rail-scheme-buenos-air/> (дата обращения: 30.06.2021).
2. Greater London.
Available at: <https://www.london.gov.uk/> (accessed 16.06.2021).
3. Crossrail Project.
Available at: <https://www.crossrail.co.uk/> (accessed 16.06.2021).

4. Madrid Region. Available at: <https://www.comunidad.madrid/servicios/salud/informe-estado-salud-poblacion> (accessed 16.06.2021).
5. Madrid Regional Transport Consortium. Available at: <https://www.crtm.es/tu-transporte-publico> (accessed 19.07.2021).
6. Buenos Aires City Hall. Available at: <https://www.buenosaires.gob.ar/rer/sistema> (accessed 19.07.2021).
7. Vlasov D. N. The principles of building, focused on mass modes of transport, in the planning of foreign transfer hubs. *Arkhitektura i stroitel'stvo Rossii*, 2015, no. 8(212), pp. 20–29. (In Russian).
8. Vlasov D. N. Urban transport systems and the development of intermodal transport. *Mir transporta*, 2016, vol. 14, no. 5(66), pp. 130–139. (In Russian).
9. Moscow Department of Transport. Available at: https://transport.mos.ru/common/upload/docs/1500303522_4.2.CarlosChristobalPinto_RUS4k3.pdf (accessed 19.07.2021).
10. The Chartered Institute of Building (CIOB). Available at: <http://www.globalconstructionreview.com/news/argentina-launches-23bn-ppp-rail-scheme-buenos-air/> (accessed 30.06.2021).

Для цитирования: Власов Д. Н. Интеграция железнодорожного транспорта в интермодальную транспортную систему города // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 9. С. 31–38. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.31-38.

For citation: Vlasov D. N. Integration Of Railway Transport Into the Intermodal Transport System of the City. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2021, no. 9, pp. 31–38. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.31-38.

Центр дополнительного профессионального образования НИУ МГСУ (ЦДПО) совместно с институтами создают специальные программы по запросам корпоративных клиентов, сформированные для удовлетворения потребности в повышении квалификации или профессиональной переподготовке кадров конкретной организации строительной отрасли. Для реализации дополнительных профессиональных программ созданы специальные учебные аудитории, укомплектованные компьютерной техникой, электронными досками, средствами связи. ЦДПО успешно функционирует и работает с профильными институтами напрямую.

Интернет-сервис для обучения по ДПО в НИУ МГСУ реализован в виде платформы открытого образования, доступ к которой возможен из любой точки страны.

Приглашаем получить дополнительную квалификацию в рамках следующих профессиональных программ:

1. «*Проектирование и техническая эксплуатация инженерных систем зданий*». Форма обуче-

ния: очная. Трудоемкость обучения: 72 ак. ч (продолжительность обучения: 1,5–2 мес). Режим обучения: 2–3 раза в неделю с 18:30 до 21:30. Стоимость обучения: 26 000 р.

2. «*Проектирование, строительство и реконструкция объектов электросетевого хозяйства*». Форма обучения: заочная. Трудоемкость обучения: 72 ак. ч. Стоимость обучения: 24 000 р.

3. «*Сооружения с развитой подземной частью в условиях мегаполисов*». Форма обучения: очно-заочная. Трудоемкость обучения: 72 ак. ч. Стоимость обучения: 32 500 р.

4. «*Проектирование механических инженерных систем в Autodesk Revit*». Форма обучения: заочная. Трудоемкость обучения: 40 ак. ч. Стоимость обучения: 26 000 р.

5. «*Проектирование и строительство внутренних и наружных инженерных систем водоснабжения и водоотведения*». Форма обучения: очно-заочная. Трудоемкость обучения: 512 ак. ч (продолжительность обучения: 6 мес). Стоимость обучения: 70 000 р.

Наши контакты

Адрес: 129337 Москва, Ярославское ш., 26, 8-й этаж ректората, ком. 807.

Проезд: до станции м. ВДНХ, далее автобусами 172, 244, 136, троллейбусом 76, маршрутными такси 76, 144, 244, 344 до остановки «ул. Вешних вод» (выйдя из транспорта, вы сразу же увидите комплекс НИУ МГСУ с 22-этажным зданием ректората).

Тел.: +7 (495) 783-86-39, 8 (495) 287-49-14 (доб. 2412, 2415, 2495, 1334), e-mail: cdpo@mgsu.ru.

Сайт: www.dpo.mgsu.ru

Возможности сочетания водопроницаемости с различными физическими свойствами полимеров

Татьяна Анатольевна МАЦЕЕВИЧ¹, доктор физико-математических наук, доцент, зав. кафедрой прикладной математики, e-mail: matseevichta@mgsu.ru

Татьяна Владимировна ЖДАНОВА¹, аспирантка, e-mail: zhdanovatv@mgsu.ru

Илья Федорович АНДРЕЕВ¹, магистр, e-mail: yfyf@gmx.com

Андрей Александрович АСКАДСКИЙ^{1,2}, доктор химических наук, профессор, зав. лабораторией полимерных материалов, e-mail: andrey@ineos.ac.ru

¹ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

² ФГБУН «Институт Элементоорганических Соединений им. А. Н. Несмеянова Российской академии наук» (ИНЭОС РАН), 119334 Москва, ул. Вавилова, 28

Аннотация. Разработанная модель и соответствующая компьютерная программа обеспечивают построение диаграмм сочетания водопроницаемости с рядом физических характеристик полимеров. К ним относятся Ван-дер-Ваальсов объем, плотность, энергия когезии, температура стеклования и начала интенсивной термической деструкции. Построены диаграммы сочетаемости водопроницаемости с рядом перечисленных характеристик для создания строительных материалов. К таким полимерам относятся полиолефины, поликарбонаты, поливинилхлорид и его модификации, полиамиды, полиуретаны и др. Метод построения «диаграмм сочетаемости» позволяет выбрать полимеры, удовлетворяющие заданным величинам водопроницаемости и всем перечисленным характеристикам. Компьютерный синтез полимеров проводится с помощью мельчайших базовых фрагментов, присоединение которых друг к другу управляется специальной матрицей. При расширении интервалов водопроницаемости и увеличении числа базовых фрагментов в повторяющемся звене полимера количество структур достигает многих десятков тысяч. Исследование показало, что для ряда ароматических полимеров существует огромное количество структур, обладающих сравнительно низкой водопроницаемостью. В то же время выбор структур с высокой водопроницаемостью существенно ограничен. Для полимеров, которые синтезируются из двух базовых фрагментов (к ним относятся полиолефины и виниловые полимеры), небольшой выбор структур с любым интервалом водопроницаемости. Таким образом, проведенная работа показала возможность быстрого выбора полимерных структур разных классов, обладающих заданным интервалом водопроницаемости. Это существенно облегчает работу специалистов, разрабатывающих новые строительные материалы, а также химиков-синтетиков, синтезирующих новые полимеры с заданными свойствами.

Ключевые слова: компьютерный синтез полимеров, водопроницаемость, температура стеклования, энергия когезии, температура начала интенсивной термической деструкции, полиолефины, виниловые полимеры, поликарбонаты, сложные полиэфиры.

POSSIBILITIES OF COMBINING WATER PERMEABILITY WITH VARIOUS PHYSICAL PROPERTIES OF POLYMERS

Tatyana A. MATSEEVICH¹, e-mail: matseevichta@mgsu.ru

Tatyana V. ZHDANOVA¹, e-mail: zhdanovatv@mgsu.ru

Ilya F. ANDREEV¹, e-mail: yfyf@gmx.com

Andrey A. ASKADSKII^{1,2}, e-mail: andrey@ineos.ac.ru

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

² A. N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences, ul. Vavilova, 28, Moscow 119334, Russian Federation

Abstract. The developed model and the corresponding computer program provide the construction of diagrams of the combination of water permeability with a number of physical characteristics of polymers. These include van der Waals volume, density, cohesion energy, glass transition temperature and temperature of the onset of intense thermal destruction. Diagrams of the compatibility of water permeability with a number of the listed characteristics have been constructed. Building is done for polymers most commonly used to create building materials. These polymers include polyolefins, polycarbonates, polyvinyl chloride and its modifications, polyamides, polyurethanes, etc. The method of constructing "compatibility diagrams" allows you to select polymers that meet the specified values of water permeability and all of the listed characteristics. Computer synthesis of polymers is carried out using the smallest base fragments, the attachment of which to each other is controlled by a special matrix. With the expansion of the water permeability

intervals and the increase in the number of basic fragments in the repeating unit of the polymer, the number of structures reaches many tens of thousands. The study showed that for a number of aromatic polymers there are a huge number of structures with relatively low water permeability. At the same time, the choice of structures with high water permeability is significantly limited. For polymers that are synthesized from two basic fragments (these include polyolefins and vinyl polymers), the choice of structures with any range of water permeability is limited. Thus, the work carried out has shown the possibility of a quick selection of polymer structures of different classes with a given interval of water permeability. This greatly facilitates the work of specialists developing new building materials, as well as synthetic chemists synthesizing new polymers with desired properties.

Key words: computer synthesis of polymers, water permeability, glass transition temperature, cohesion energy, temperature of the onset of intense thermal degradation, polyolefins, vinyl polymers, polycarbonates, polyesters.

В настоящее время большое внимание уделяется цифровым методам прогнозирования свойств полимеров, поскольку они упрощают работу химиков-синтетиков. Вместо длительных и трудоемких экспериментов многие физические свойства полимеров можно предсказать заранее, основываясь на их химической структуре. Естественно, такие задачи должны решаться с помощью компьютерных программ. Свойства должны предсказываться после того, как химическая структура повторяющегося полимерного звена отображается на экране дисплея. Это так называемая прямая задача. Обратная задача заключается во вводе в компьютер интервалов требуемых характеристик с последующим компьютерным синтезом полимеров, обладающих заданными характеристиками.

Молекулярное моделирование для изучения строения макромолекул и различных химических реакций с их участием становится все более востребованным инструментом [1–16]. Методы молекулярного моделирования позволяют также изучать и решать задачи наноструктур [17] и создания новых полимерных материалов [18]. В монографии [1] подробно рассмотрены методы и алгоритмы молекулярного моделирования.

В данной статье авторы привели полученные диаграммы сочетаемости водопроницаемости полимеров с рядом физических характеристик (Ван-дер-Ваальсов объем, плотность, энергия когезии, температура стеклования и начала интенсивной термической деструкции) и соотношения, связывающие эти характеристики с водопроницаемостью.

Описание водопроницаемости P полимеров проводили [19, 20] по общему уравнению

$$P = P_0 e^{\frac{\Delta E}{RT}}, \quad (1)$$

где P_0 – константа; $e = 2,72$; ΔE – энергия активации процесса проницаемости; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура.

Величину ΔE вычисляли из соотношения [19, 20]

$$\Delta E = \frac{\sum_i \Delta E_i^{**}}{N_A \sum_i \Delta V_i}, \quad (2)$$

где $\sum_i \Delta E_i^{**}$ – энергия межмолекулярного взаимодействия, складывающаяся из энергии взаимодействия каждого атома и специфических атомных групп, которые вызывают диполь-дипольные взаимодействия или водородные связи; N_A – число Авогадро; $\sum_i \Delta V_i$ – Ван-дер-Ваальсов объем повторяющегося звена полимера.

Тогда

$$\ln P = \ln P_0 - \frac{\sum_i \Delta E_i^{**}}{N_A RT \sum_i \Delta V_i}. \quad (3)$$

После небольших преобразований имеем:

$$\frac{\sum_i \Delta E_i^{**}}{RT} - \left(N_A \sum_i \Delta V_i \right) \ln P_0 = - \left(N_A \sum_i \Delta V_i \right) \ln P. \quad (4)$$

Атомные константы и параметры, характеризующие энергию сильных межмолекулярных взаимодействий, приведены в работах [19, 20]. Величина $\ln P_0 = 3,002$ (Баррер).

Температура стеклования получена из уравнения

$$T_d = \frac{\sum_i \Delta V_i}{\left(\sum_i a_i \Delta V_i + \sum_j b_j \right)_l + \left(\sum_i K_i \Delta V_i \right)_{cr.p}}, \quad (5)$$

где $\sum_i \Delta V_i$ – Ван-дер-Ваальсов объем повторяющегося фрагмента полимерной сетки; $\left(\sum_i a_i \Delta V_i + \sum_j b_j \right)_l$ – набор атомных констант для повторяющегося звена межузловых цепей; $\left(\sum_i K_i \Delta V_i \right)_{cr.p}$ – то же, для узла сетки (физический смысл параметров a_i , b_j и K_i см. в [1]).

Температуру начала интенсивной термической деструкции определяли согласно выражению

$$T_d = \frac{\sum_i \Delta V_i}{\sum_i K_i \Delta V_i}, \quad (6)$$

где K_i – атомные константы, связанные с параметрами потенциала Морзе, $K_i = \frac{63}{2} \frac{R}{(ad_0 E)_i}$; a и d_0 – параметры потенциала Морзе; E – энергия химической связи.

Для сополимеров действует соотношение

$$T_g = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} \alpha_k \left(\sum_i \Delta V_i \right)}{\sum_{k=1}^{k=n} \alpha_k \frac{\left(\sum_i \Delta V_i \right)}{T_{g,k}} + 0,03 \sum_{k=1}^{k=n} \alpha_k (1 - \alpha_k)}, \quad (7)$$

где α_k – мольная доля k -го компонента; n – количество компонентов; $T_{g,k}$ – температура стеклования k -го компонента; $\sum_i \Delta V_i$ – Ван-дер-Ваальсов объем k -го компонента.

Энергию когезии ΔE^* находили из уравнения

$$\Delta E^* = \sum_i E_i^*, \quad (8)$$

где ΔE_i^* – вклад каждого атома и типа межмолекулярного взаимодействия в $\sum_i E_i^*$.

Энергия когезии повторяющегося звена полимера получена по формуле [1]

$$\sum_i E_i^* = \delta^2 N_A \sum_i \Delta V_i, \quad (9)$$

где δ – параметр растворимости (параметр Гильдебранда).

Плотность полимеров ρ имеет вид:

$$\rho = \frac{Mk}{N_A \sum_i \Delta V_i}, \quad (10)$$

где M – молекулярная масса повторяющегося звена; k – коэффициент молекулярной упаковки (усредненная величина $k = 0,681$).

Получим соотношения, связывающие водопроницаемость с остальными рассмотренными выше характеристиками, поскольку во все уравнения входит Ван-дер-Ваальсов объем повторяющегося звена полимера. Водопроницаемость и температура стеклования линейных полимеров связаны следующим образом:

$$\ln P = 3,002 - \frac{\sum_i E_i^{**}}{N_A RTT_g \left(a_i \Delta V_i + \sum_i b_j \right)}. \quad (11)$$

Связь водопроницаемости и температуры начала интенсивной деструкции можно записать:

$$\ln P = 3,002 - \frac{\sum_i E_i^{**}}{N_A RTT_d \sum_i K_i \Delta V_i}. \quad (12)$$

Водопроницаемость связана с плотностью таким образом:

$$\ln P = 3,002 - \frac{\rho \sum_i \Delta E_i^{**}}{RTMk}, \quad (13)$$

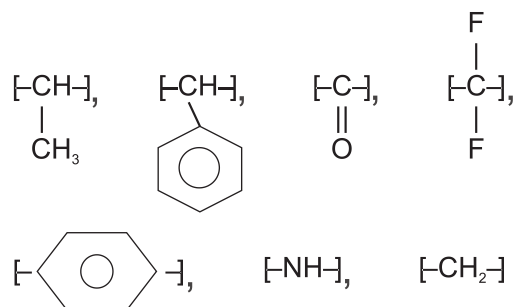
а с энергией когезии уравнением

$$\ln P = 3,002 - \frac{\delta^2 \sum_i \Delta E_i^{**}}{RT \sum_i \Delta E_i^*}. \quad (14)$$

Результаты построения диаграмм сочетаемости представлены на *рис. 1–3*. Характеристики и размерности на этих рисунках следующие:

- водопроницаемость (Water permeability), Бар-пер;
- температура стеклования (Glass transition temperature), К;
- Ван-дер-Ваальсов объем (Van der Waals volume), нм^3 ;
- температура начала интенсивной термической деструкции (Intense thermal degradation onset temperature), К;
- плотность (Density), г/см^3 ;
- энергия когезии (Cohesion energy), Дж/моль.

Диаграммы совместимости получены для различных классов полимеров, содержащих разное число базовых фрагментов. Базовый фрагмент представляет собой мельчайшую химическую структуру, которую мысленно нельзя «разрезать» вдоль оси структуры. К таким структурам, в частности, относятся:



и др.

Получены величины минимальной и максимальной водопроницаемости полимеров разных классов. Для строительных отделочных материалов, эксплуатируемых во внешней среде, важна минимальная водопроницаемость. При строительстве автомобильных магистралей имеет значение максимальная водопроницаемость. Асфальтовая смесь, содержащая полимеры, быстро пропускает дождевую воду в нижележащий грунт.

Количество синтезированных с помощью компьютера полимеров зависит от числа базовых фрагментов, вводимых для построения повторяющихся звеньев. Для полиолефинов, виниловых полимеров, полистиролов повторяющееся звено состоит

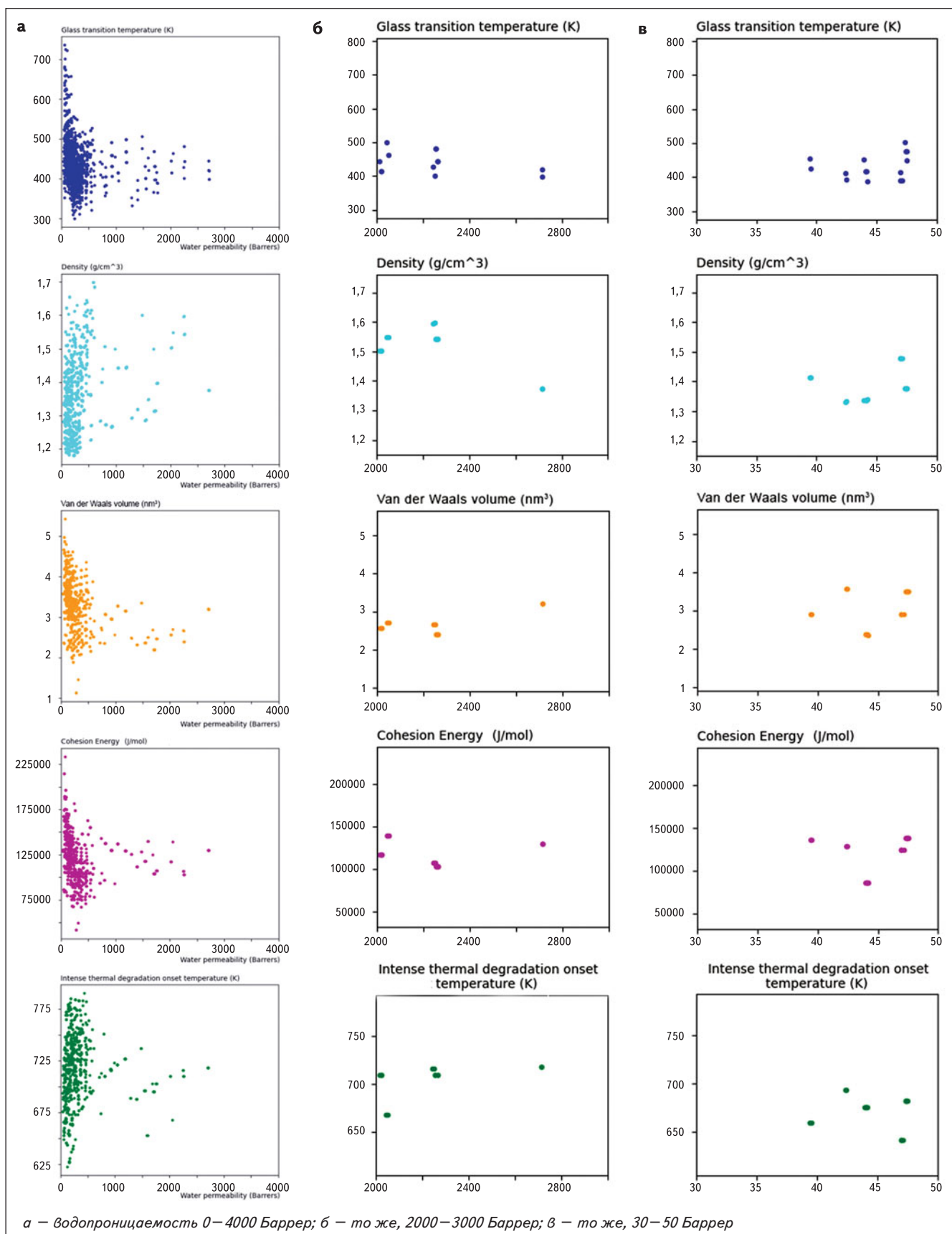


Рис. 1. Пример некоторых структур полимеров и диаграммы совместимости для класса поликарбонатов с пятью базовыми фрагментами

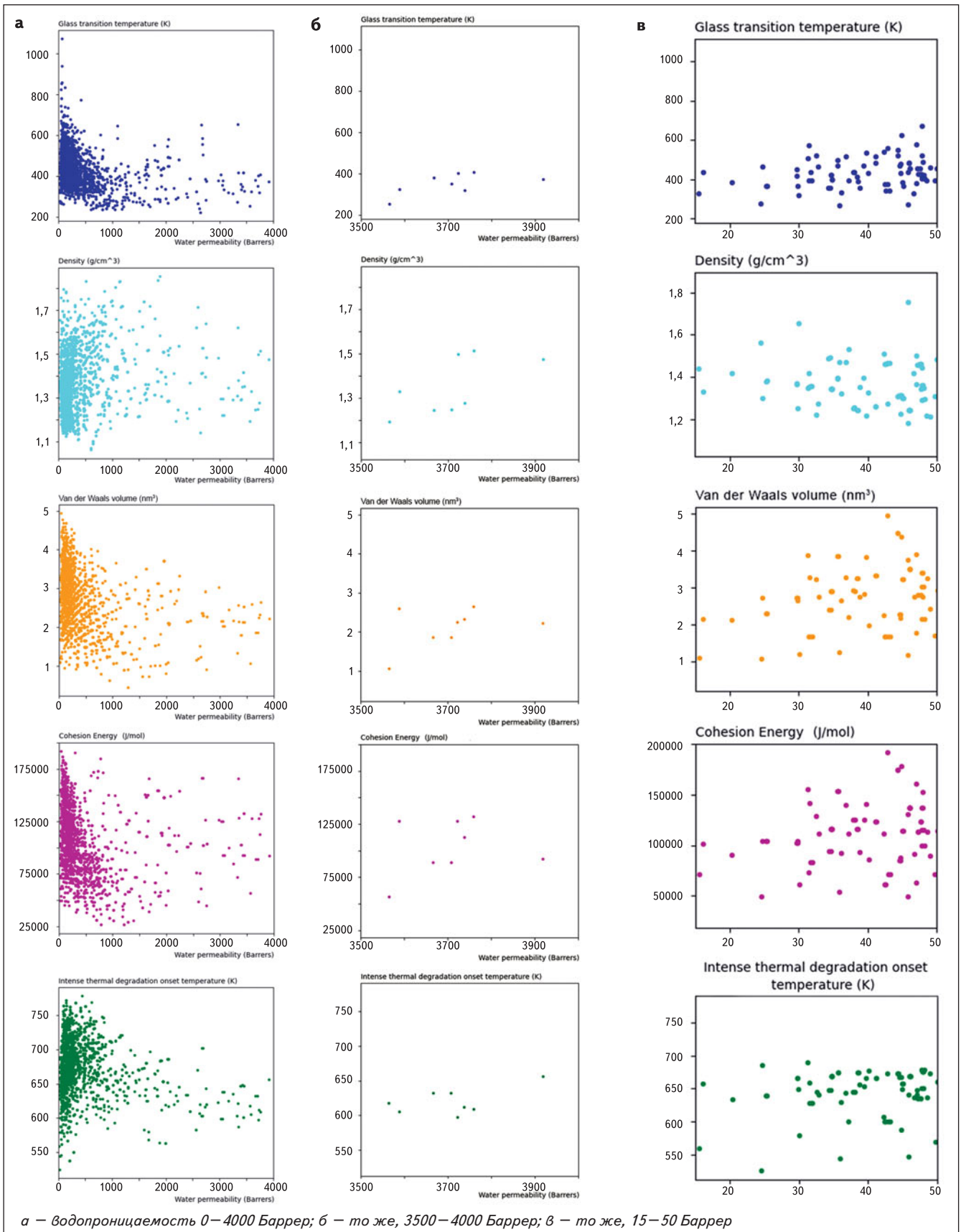


Рис. 2. Некоторые полимеры и диаграммы совместимости для класса сложных полиэфиров с шестью базовыми фрагментами

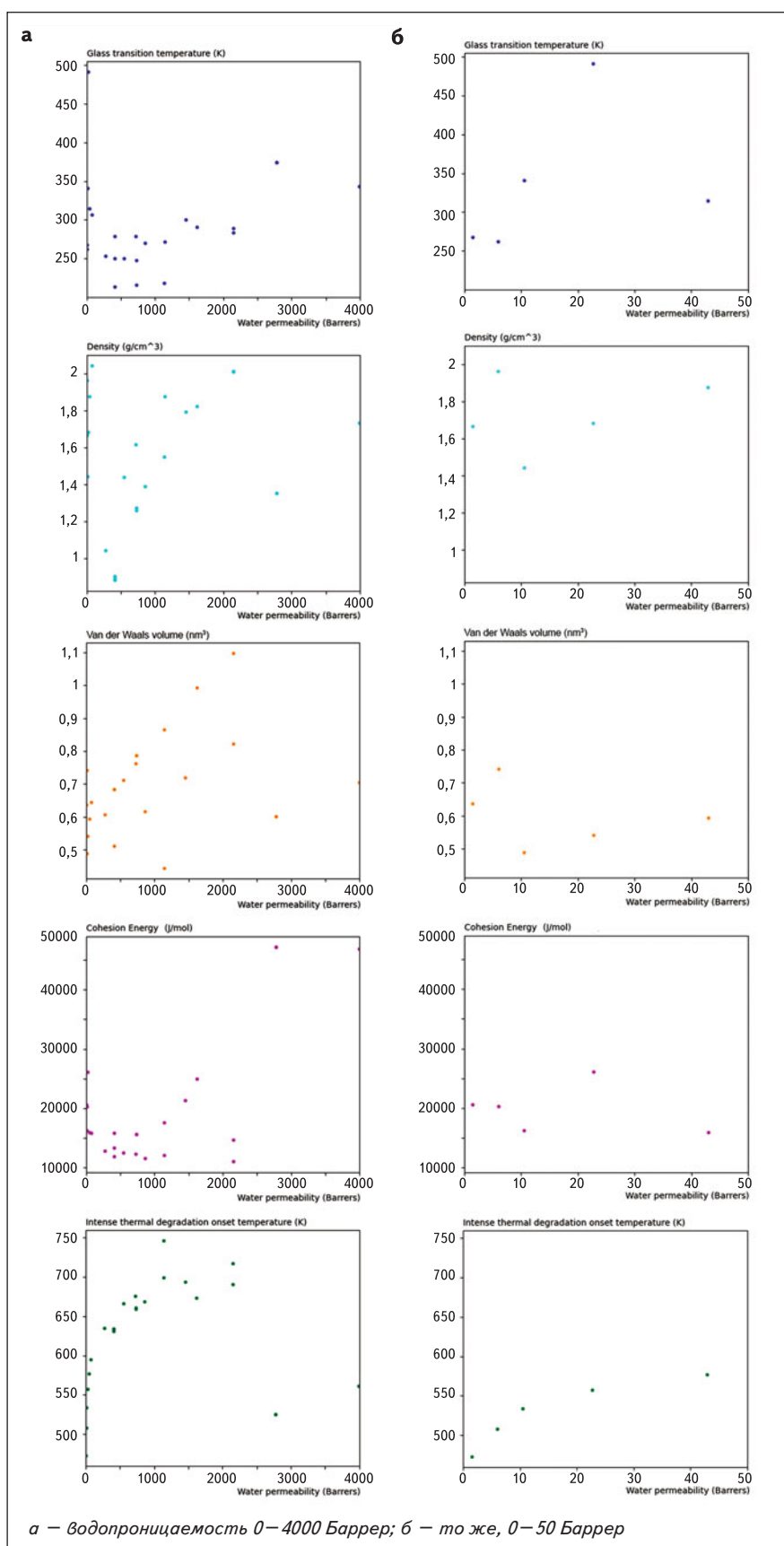


Рис. 3. Полимеры и диаграммы совместимости для класса полиолефинов и виниловых полимеров с двумя базовыми фрагментами

из двух базовых фрагментов. Для поликетонов, полиэфиркетонов, сложных полиэфиров и поликарбонатов количество базовых фрагментов в повторяющихся звеньях может быть больше четырех. Для проведенных расчетов количество базовых фрагментов выбрано равным пяти или шести.

У поликарбонатов с пятью базовыми фрагментами (общее количество структур порядка 2×10^3) при построении диаграмм совместимости заметно (рис. 1а) распределение характеристик в сторону низких значений водопроницаемости. Поэтому выделим диапазоны низких (30–50 Баррер, рис. 1б) и высоких (2000–3000 Баррер, рис. 1в) значений водопроницаемости на основе построенных графиков для всех структур поликарбонатов.

Сложные полиэфиры с шестью базовыми фрагментами (общее количество структур порядка 2×10^3 , рис. 2а). Выделим следующие диапазоны низких (15–50 Баррер, рис. 2б) и высоких (3500–4000 Баррер, рис. 2в) значений водопроницаемости для всех структур сложных полиэфиров.

Полиолефины и виниловые полимеры с двумя базовыми фрагментами (общее количество структур 25). Диаграммы сочетаемости для данных классов полимеров показаны на рис. 3. Для полиолефинов и виниловых полимеров с двумя базовыми фрагментами (водопроницаемость от 3500 до 4000 Баррер) количество полимеров мало.

В МГСУ предложены модели и написаны компьютерные программы для расчета диаграмм совместимости водопроницаемости с рядом физических характеристик полимеров. В ИНЭОС РАН разработана модель для расчета водопроницаемости полимеров по их химическому строению.

В ы в о д

Метод построения «диаграмм сочетаемости» позволяет выбрать полимеры, удовлетворяющие заданным свойствам (водопроницаемость, плотность, энергия когезии, температура стеклования и начала интенсивной термической деструкции). При расширении интервалов водопроницаемости и увеличении числа базовых фрагментов в повторяющемся звене полимера количество структур достигает многих десятков тысяч. Из ряда полимеров (полиуретаны, полисульфоны, полисульфиды, простые и сложные полиэфиры, полиамиды, поликетоны и полиэфиркетоны) можно выбрать огромное количество структур, обладающих сравнительно низкой водопроницаемостью. Выбор структур с высокой водопроницаемостью существенно ограничен. Для полиолефинов, виниловых полимеров, акриловых и метакриловых полимеров выбор структур с высокой и низкой водопроницаемостью всегда мал.

Причина, как отмечено выше, заключается в том, что повторяющиеся звенья полимеров этой группы синтезируются из двух базовых фрагментов, а для остальных полимеров — из пяти или шести базовых фрагментов. В целом проведенная работа показала возможность быстрого выбора полимерных структур разных классов, обладающих заданной водопроницаемостью, что существенно облегчает работу химиков-синтетиков и специалистов, разрабатывающих новые строительные материалы.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект «Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз» № FSWG-2020-0007 (МГСУ) и тема Госзадания ИНЭОС РАН № 0085-2019-0004).

Л И Т Е Р А Т У Р А / R E F E R E N C E S

1. Askadskii A. A. *Computational materials science of polymers* [Компьютерное материаловедение полимеров]. Cambridge, International Science Publ., Cambridge, 2003. 695 p.
2. Davris T., Lyulin A. V., Baljon A. R. C. et. al. Linear viscoelasticity of polymers and polymer nanocomposites: molecular-dynamics large amplitude oscillatory shear and probe rheology simulations [Линейная вязкоупругость полимеров и полимерных нанокомпозитов: молекулярно-динамическое моделирование сдвиговых колебаний большой амплитуды и зондовая реология]. *The Scaling of Relaxation Processes. Advances in Dielectrics*. Cham, Springer Publ., 2018, pp. 375–404.
Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-72706-6_12 (accessed 01.06.2021).
3. Nazarychev V. M., Lyulin A. V., Larin S. V. et al. Molecular dynamics simulations of uniaxial deformation of thermoplastic polyimides [Молекулярно-динамическое моделирование одноосной деформации термопластичных полиимидов]. *Soft Matter*, 2016, no. 12, pp. 3972–3981.
4. Glova A. D., Melnikova S. D., Mercurieva A. A. et al. Grafting-induced structural ordering of lactide chains [Структурное упорядочение лактидных цепей, вызванное привитой сополимеризацией]. *Polymers*, 2019, vol. 11(12), no. 2056, pp. 1–18.
Available at: <https://doi.org/10.3390/polym11122056> (accessed 01.06.2021).
5. Gavrilo A. A., Chertovich A. V. Computer simulation of random polymer networks: Structure and properties [Компьютерное моделирование беспорядоченных полимерных сеток: Структура и свойства]. *Polymer Science — Series A*, 2014, vol. 56, no. 1, pp. 90–97.
6. Крыжановский В. К., Бурлов В. В. Прикладная физика полимерных материалов. СПб : СПбГТИ(ТУ), 2001. 261 с.
6. Kryzhanovskiy V. K., Burlov V. V. *Prikladnaya fizika polimernykh materialov* [Applied physics of polymer materials]. St.Petersburg, SPbGTI(TU) Publ., 2001. 261 p. (In Russian).
7. Schlick T. *Molecular modeling and simulation. Interdisciplinary applied mathematics* [Моделирование и конструирование молекул. Междисциплинарная прикладная математика]. Berlin, Springer Publ., 2010. 34 p.
8. Кузуб Л. И., Иржак В. И. Эффективное время релаксации как метод характеристики релаксационных спектров полимеров // Высокомолекулярные соединения. 2004. Серия А.46. № 2. С. 304–313.
8. Kuzub L. I., Irzhak V. I. Effective relaxation time as a method for characterizing relaxation spectra of polymers. *Vysokomolekulyarnye soedineniya*, 2004, seriya A.46, no. 2, pp. 304–313. (In Russian).
9. *Japan association for chemical innovation. Computer simulation of polymeric materials* [Компьютерное конструирование полимерных материалов]. Singapore, Springer Publ., 2016. 400 p.
10. Mahmoudi P. *Entropic segregation at surfaces of polymer melts* [Энтропийный механизм сегрегации на поверхностях полимерных расплавов]. Waterloo, University of Waterloo Publ., 2018. 119 p.
11. Khattab I. Al., Sinapius M. Multiscale modelling and simulation of polymer nanocomposites using transformation field analysis (TFA) [Мультиразмерное моделирование и конструирование полимерных нанокомпозитов с использованием анализа поля трансформации]. *Composite Structures*, 2018, vol. 209, pp. 981–991.

12. Иванов В. А., Рабинович А. Л., Хохлов А. Р. Методы компьютерного моделирования для исследования полимеров и биополимеров. М.: ЛИБРОКОМ, 2009. 696 с.
12. Ivanov V. A., Rabinovich A. L., Khokhlov A. R. *Metody komp'yuternogo modelirovaniya dlya issledovaniya polimerov i biopolimerov* [Computer modeling methods for the study of polymers and biopolymers]. Moscow, LIBROKOM Publ., 2009. 696 p. (In Russian).
13. Аристов В. М., Аристова Е. П. Математическое моделирование изменения структурной неоднородности и свойств полимеров при технологических процессах их термообработки // Пластические массы. 2018. № 5-6. С. 35-37.
13. Aristov V. M., Aristova E. P. Mathematical modeling of changes in the structural heterogeneity and properties of polymers during technological processes of their heat treatment. *Plasticheskie massy*, 2018, no. 5-6, pp. 35-37. (In Russian).
14. Buthaina A., Ibrahim Kadum K. M. Influence of polymer blending on mechanical and thermal properties [Влияние смешения полимеров на механические и термические свойства]. *Modern Applied Science*, 2010, vol. 4, no. 9, pp. 157-161.
14. Мацевич Т. А. Релаксационные и барьерные свойства полимерных материалов строительного назначения. Дис ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2017. 388 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006662207> (дата обращения: 01.06.2021).
15. Matseevich T. A. *Relaksatsionnye i bar'ernye svoystva polimernykh materialov stroitel'nogo naznacheniya* [Relaxation and barrier properties of polymeric materials for construction purposes]. Moscow, 2017. 388 p. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006662207> (accessed 01.06.2021). (In Russian).
16. Иванов В. А., Мартеньянова Ю. А., Родионова А. С., Стукан М. Р. Компьютерное моделирование жесткоцепных полимеров // Высокомолекулярные соединения. 2013. Серия С. Т. 55. № 7. С. 808-828.
16. Ivanov V. A., Martem'yanova Yu. A., Rodionova A. S., Stukan M. R. Computer simulation of rigid chain polymers. *Vysokomolekulyarnye soedineniya*, 2013, Seriya C, vol. 55, no. 7, pp. 808-828. (In Russian).
17. Matthew D., Eaton L., Brinson C., Kenneth R. S. Temperature dependent fracture behavior in model epoxy networks with nanoscale heterogeneity [Механизм разрушения в зависимости от температуры в модельных эпоксидных сетках с наноразмерными неоднородностями]. *Polymer*, 2021, vol. 221, art. 123560.
18. Аскадский А. А., Мацевич С. В., Мацевич Т. А. Подбор структурных фрагментов сетчатых полимеров, применяемых в строительстве // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 3. С. 347-359.
18. Askadskii A. A., Matseevich S. V., Matseevich T. A. Selection of structural fragments of cross-linked polymers used in construction. *Vestnik MGSU*, 2021, vol. 16, iss. 3, pp. 347-359. (In Russian).
19. Askadskii A. A., Zhdanova T. V., Andreev I. F. et al. Connection of water permeability with a number of physical properties of polymers [Связь водопроницаемости с рядом физических свойств полимеров]. *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 263, art. 01022.
20. Аскадский А. А., Афанасьев Е. С., Мацевич Т. А. [и др.]. Расчетная схема для оценки проницаемости воды через полимеры и сополимеры // Высокомолекулярные соединения. 2015. Серия А.57. № 6. С. 582-604.
20. Askadskii A. A., Afanas'ev E. S., Matseevich T. A. et al. Calculation scheme for assessing water permeability through polymers and copolymers. *Vysokomolekulyarnye soedineniya*, 2015, Seriya A. 57, no. 6, pp. 582-604. (In Russian).

Для цитирования: Мацевич Т. А., Жданова Т. В., Андреев И. Ф., Аскадский А. А. Возможности сочетания водопроницаемости с различными физическими свойствами полимеров // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 9. С. 39-46. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.39-46.

For citation: Matseevich T. A., Zhdanova T. V., Andreev I. F., Askadskii A. A. Possibilities of Combining Water Permeability With Various Physical Properties of Polymers. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2021, no. 9, pp. 39-46. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.39-46. ■

Центр дополнительного профессионального образования (ЦДПО) НИУ МГСУ занимается организацией деятельности по дополнительному профессиональному образованию (ДПО), а также специальными образовательными проектами, программами, реализуемыми в сетевой форме. Кафедры НИУ МГСУ разрабатывают и реализуют программы профессиональной переподготовки и повышения квалификации по конкретному запросу – техническому заданию от корпоративных клиентов по актуальным направлени-

ям: градостроительство, архитектура, технологии информационного моделирования, экономика и управление строительством, проектирование и строительство зданий и сооружений, охрана труда, комплексная безопасность и др.

Дополнительную информацию можно получить по тел.: +7 (495) 783-86-39, 8 (495) 287-49-14 (доб. 2412, 2415, 2495, 1334), e-mail: cdpo@mgsu.ru или на сайте: www.dpo.mgsu.ru.

Физическое моделирование грузового причала терминала «Утренний»

Андрей Сергеевич ШУНЬКО, инженер, e-mail: andrejj.shunk@rambler.ru

Наталья Владимировна ШУНЬКО, кандидат технических наук, e-mail: natshunko@rambler.ru

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований работы конструкции причала, представляющего собой вертикальную стенку из металлического шпунта (типа больверк), на его физической модели при воздействии ветровых волн. Данная работа является научным сопровождением проекта причальной набережной терминала сжиженного природного газа и стабильного газового конденсата «Утренний», возводимого в суровых арктических условиях нашей страны. Эксперименты проводились с применением новейшей измерительной аппаратуры и уникального лабораторного оборудования. На основании анализа проведенных исследований были разработаны рекомендации по назначению оптимальной высотной отметки нагвонной части проектируемого причального сооружения. Результаты работы позволят при реализации проекта терминала свести к минимуму риск его аварии и обеспечить безаварийную эксплуатацию причала, что даст возможность непрерывной отгрузки сжиженного природного газа и стабильного газового конденсата на нефтегазоконденсатном месторождении.

Ключевые слова: отметка кордона причала, набережная, строительный период, физическое моделирование, обеспеченность шторма, параметры волн, уровень воды, волновой заплеск.

PHYSICAL MODELING OF THE CARGO BERTH OF THE TERMINAL “UTRENNY”

Andrey S. SHUNKO, e-mail: andrejj.shunk@rambler.ru

Natalia V. SHUNKO, e-mail: natshunko@rambler.ru

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

Abstract. The results of experimental studies of the work of the berth structure, which is a vertical wall made of metal sheet piling (bolwerk type) on its physical model when exposed to wind waves, are presented. This work is a scientific support for the project of the berthing embankment of the Terminal of liquefied natural gas and stable gas condensate “Utrenny”, which is being built in the harsh Arctic conditions of our country. The experiments were carried out using the latest measuring equipment and unique laboratory equipment. Based on the analysis of the conducted studies, recommendations were developed for the appointment of the optimal elevation of the surface part of the projected mooring structure. The results of the work will make it possible, when implementing the Terminal project, to minimize the risk of its accident and ensure trouble-free operation of the berth, which will enable the continuous shipment of liquefied natural gas and stable gas condensate at the oil and gas condensate field.

Key words: marker of pier cordon, embankment, construction period, physical modeling, storm security, wave parameters, water level, wave splash.

Строительство любого морского порта или терминала связано не только со значительными капитальными вложениями, но и вмешательством в природные условия, которые формировались в этом районе долгое время. Поэтому проведение физического моделирования с исследованием работы проектируемых морских сооружений и внесением предложений по корректировке проекта в части гидротехнических решений чрезвычайно важно, в том числе и в пла-

не сохранения экологического баланса.

Объект исследования – сооружение причальной набережной терминала сжиженного природного газа и стабильного газового конденсата «Утренний», расположенного в Ямало-Ненецком автономном округе, в Тазовском районе.

Терминал является структурным элементом создаваемого комплекса по производству, хранению, отгрузке сжиженного природного газа (СПГ) и ста-

бильного газового конденсата (СГК) на Салмановском (Утреннем) нефтегазоконденсатном месторождении. Данный комплекс составляет портовую инфраструктуру и предназначен для отгрузки на морской транспорт его продукции, которая осуществляется непосредственно от производственных технологических блоков, путем швартовки к ним транспортных судов. По величине извлекаемых запасов рассматриваемое месторождение – крупнейшее из открытых на Гы-

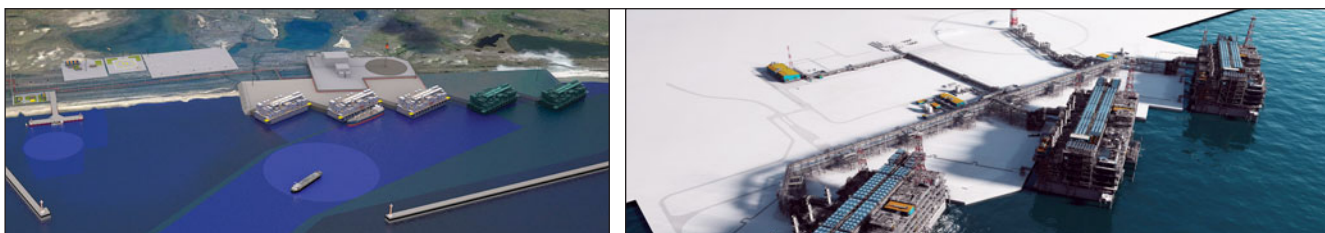


Рис. 1. Расположение причальных сооружений терминала «Утренний»

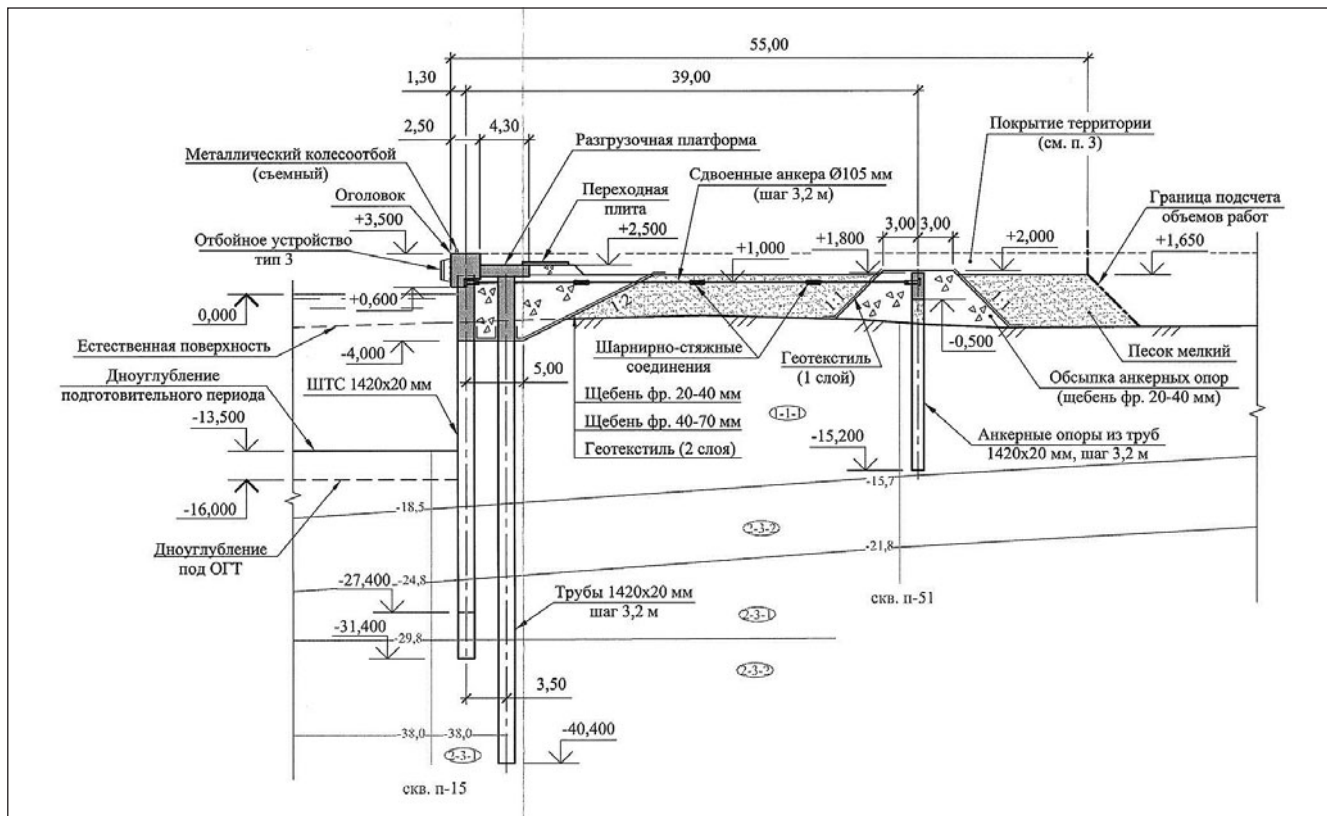


Рис. 2. Поперечный разрез причальной набережной терминала «Утренний»

данском полуострове, и его освоение стратегически важно для нашей страны*.

Проектируемые гидротехнические сооружения (причальная набережная и берегоукрепление образуемой территории) входят в состав объектов строительного периода терминала «Утренний». Причальная набережная предназначена для приема судов со строительными грузами на этапе возведения порта, а также для размещения и обслуживания технологических линий завода СПГ и СГК на последующих эта-

пах строительства и эксплуатации терминала.

При выборе конструкций определяющими факторами служили естественные условия района размещения: суровая продолжительная зима, тяжелые ледовые и инженерно-геологические условия площадки строительства. Кроме того, конструкции причальной набережной определялись технологическими требованиями к сооружению, а именно необходимостью создания вертикальных стенок с глубинами акватории, обеспечиваю-

щими постановку основания гравитационного типа у набережной. Общий вид причальной набережной терминала представлен на рис. 1.

К волновым воздействиям на морские гидротехнические сооружения, которые необходимо учитывать на различных стадиях проектирования, относится величина заплеска волн. Волновой заплеск на сооружение определяет положение отметок надводных частей над расчетным уровнем воды с тем, чтобы гребень расчетной волны в системе расчетного шторма не препятствовал нормальной эксплуатации

* Указ Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 г.».

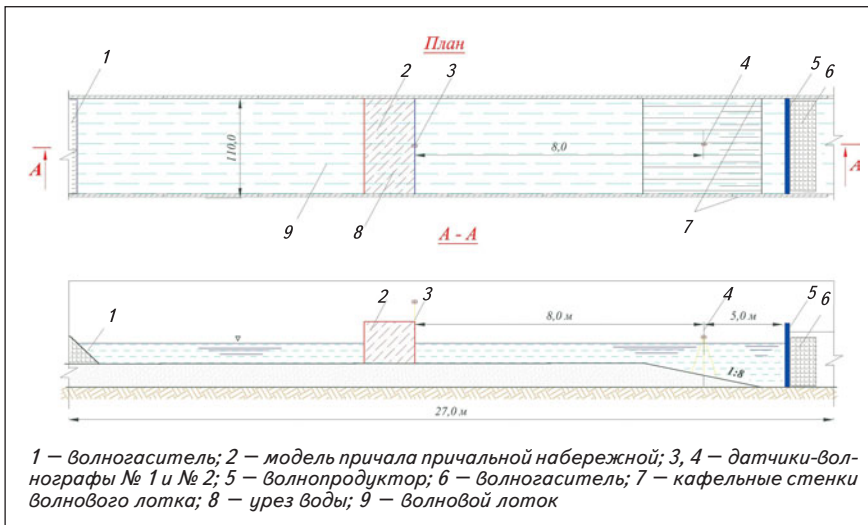


Рис. 3. Схема экспериментальных исследований

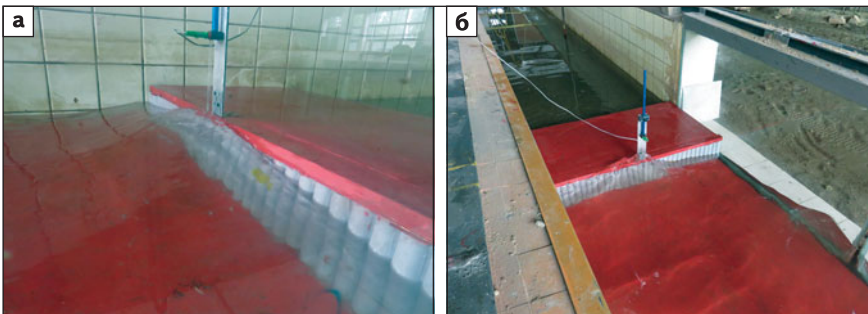


Рис. 4. Экспериментальные исследования в волновом лотке, отметка кордона причальной набережной +3,500 м

объекта. При необоснованном завышении верхних отметок будет увеличиваться стоимость сооружений, а при занижении – возможны переливы воды, обледенение и различные аварии. В этой связи обязательно следует уточнять верхние отметки сооружений в процессе научного сопровождения каждого конкретного проекта на основании анализа результатов физического моделирования.

С помощью физического моделирования в волновом лотке была исследована причальная набережная, представляющая собой гидротехническое сооружение для приема, швартовки и обработки грузовых судов. Тип исполнения – свайная конструкция в виде сплошной вертикальной стенки из заанкеренного больверка. Учитывая временный

характер использования причальной набережной для приема транспортных судов, отметка кордона была принята из условия обеспечения безопасной стоянки и обработки расчетных судов (рис. 2) в строительный период и составляла +3,500 м (отметки даны в Балтийской системе высот 1977 г.). Лицевая стенка на всех участках набережной предусмотрена из шпунта трубчатого сварного сечения из стальных труб размером 1420×20 мм, с приваренными к ним замковыми соединениями (фасонные профили шириной 180 мм).

Исследование воздействия штормового волнения западного направления на сооружение причала набережной (см. рис. 2) проводилось с параметрами волнения, рассчитанными по реко-

мендации СП 38.13330.2019 «СНиП 2.06.04-82* Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)»: $h_{cp} = 2,4$ м, $T_{cp} = 4,8$ с (натурные данные). Расчетный уровень для приливных морей составил +0,380 м БС-77 в соответствии с ВСП 33-03-07 «Инструкция по проектированию откосных и сквозных ограждающих сооружений и специальных подводных стендов», отметка кордона причальной набережной – +3,500 м БС-77, глубина воды у причальной набережной – 4 м.

Испытания проводили в НОЦ «Гидротехника» НИУ МГСУ, модель поперечного сечения причала в масштабе 1:40 устанавливали в волновом лотке шириной 1,1 м, длиной 27 м (рис. 3). Методика проведения исследований стандартная для подобного вида работ, основанная на положениях теории подобия натурального и модельного объекта, с применением критерия Фруда [1–3]. В экспериментах использовали оборудование фирмы HR Wallingford (Великобритания) с автоматизированной системой сбора и обработки информации в режиме реального времени [4–6]. Средняя квадратичная погрешность измерения высоты волны в экспериментах составляла не более ± 2 %, а доверительный интервал – не менее 90 %.

Цель исследования – определение результирующей высоты волны у вертикальной стенки причальной набережной, а также величины волнового заплеска на сооружение причальной набережной и его высотной отметки. Кроме того, на основе полученных данных необходимо подобрать высотную отметку кордона причальной набережной с учетом отсутствия волнового заплеска на верхнее строение причала.

В экспериментах применяли

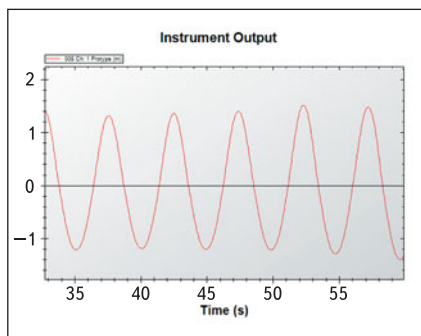


Рис. 5. Волнограмма в опыте с параметрами волнения $h_{ср} = 2,4$ м, $T_{ср} = 4,8$ с на подходе к сооружению (показания волнографа № 1)

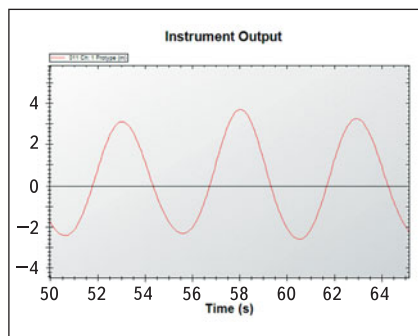


Рис. 6. Волнограмма в опыте у сооружения (показания волнографа № 2)



Рис. 7. Отсутствие волнового заплеска на верхнее строение причала, отметка кордона причальной набережной +4,500 м

два датчика-волнографа (см. рис. 3):

- волнограф № 1 устанавливали на глубокой воде для контроля соответствия генерируемых параметров волнения заданным в эксперименте ($h_{ср} = 2,4$ м; $T_{ср} = 4,8$ с);
- волнограф № 2 крепили на верхнее строение причала для фиксации результирующей волны у вертикальной стенки сооружения.

Экспериментальные исследования в волновом лотке (отметка кордона причальной набережной +3,500 м) показаны на рис. 4.

С помощью программы HR DAQ, которая входила в состав измерительной системы, в режиме реального времени проводили пересчет фиксируемых датчиками-волнографами модельных параметров волнения в натурные, что позволяло получать информацию о высоте волны и ее периоде по ходу эксперимента уже в натуральных единицах. Графики колебания волновой поверхности в зонах расположения волнографов № 1 и № 2 представлены на рис. 5, 6. По показаниям волнографа № 2 (см. рис. 6) видно, что результирующая

высота волны у вертикальной стенки сооружения причала $h = 6$ м, так как гребень волны равен 3,7 м, высота волнового заплеска: $3,7$ м + $0,38$ м = $4,08$ м.

Результаты экспериментальных исследований показали, что отметка кордона причальной набережной должна составлять +4,500 м над расчетным уровнем воды. Далее работы были продолжены на модели причальной набережной с отметкой кордона +4,500 м. Все условия эксперимента были аналогичны предыдущему опыту. Проведенные работы показали отсутствие волнового заплеска (рис. 7) на верхнее строение причальной набережной при подходе волн с расчетными параметрами $h_{ср} = 2,4$ м и $T_{ср} = 4,8$ с.

Вывод

На основе проведенных исследований причала набережной установлено, что на результирующую высоту волны у вертикальной стенки сооружения оказывают влияние различные совокупные факторы, которые не всегда возможно учесть в процессе расчетов конструкции по нормативным документам. Для недопущения ошибок и неточностей в проекте и последующих аварийных ситуаций было проведено физическое моделирование воздействия расчетного шторма на проектное сооружение. Выполненные эксперименты позволили подобрать оптимальную высотную отметку и своевременно внести корректировку в проект.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Ляхтер В. М., Прудовский А. М. Гидравлическое моделирование. М.: Энергоатомиздат, 1984. 392 с.
1. Lyakhter V. M., Prudovskiy A. M. *Gidravlichesкое modelirovanie* [Hydraulic modeling]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 392 p. (In Russian).
2. Леви И. И. Моделирование гидравлических явлений. Л.: Энергия, 1967. 235 с.
2. Levi I. I. *Modelirovanie gidravlicheskikh yavleniy* [Modeling of hydraulic phenomena]. Leningrad, Energiya Publ., 1967. 235 p. (In Russian).
3. Алабужев П. М. [и др.]. Теория подобия и размерностей моделирования. М.: Высшая школа, 1968. 206 с.
3. Alabuzhev P. M. et al. *Teoriya podobiya i razmernostey modelirovaniya* [The theory of similarity and dimensions of modeling]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1968. 206 p. (In Russian).

4. Beresford P. J. *HR Wave Maker. Wave generation control program. Software manual*. [Программа управления генерацией волн. Руководство по программному обеспечению]. HR Report IT 453, iss. 5, August, 2003.
5. Aziz Tayfun M. Sampling-rate errors in statistics of wave heights and periods [Ошибки частоты дискретизации в статистике высот и периодов волн]. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 1993, vol. 119, no. 2. DOI:10.1061/(ASCE)0733-950X(1993)119:2(172).
6. Perrott D. *How to determine analogue sampling system parameters* [Как определить параметры аналоговой системы выборки]. Internal memo, HR Wallingford, 1992.

Для цитирования: Шунько А. С., Шунько Н. В. Физическое моделирование грузового причала терминала «Утренний» // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 9. С. 47–51. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.47-51.

For citation: Shunko A. S., Shunko N. V. Physical Modeling of the Cargo Berth of the Terminal “Utrenny”. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2021, no. 9, pp. 47–51. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.47-51. ■

Центр дополнительного профессионального образования (ЦДПО) НИУ МГСУ реализует 130 программ по основным профессиональным блокам:

- управленческий блок;
- блок программ по технологиям информационного моделирования;
- блок программ по проектированию;
- блок программ по компетенциям стадии строительства объекта;
- блок программ по компетенциям стадии эксплуатации объекта;
- блок программ по инженерным системам;
- блок программ социального взаимодействия в отрасли;
- блок программ по иностранным языкам, в том числе с уклоном в техническую лексику отрасли.

Дополнительное профессиональное образование в НИУ МГСУ характеризуется широким спектром программ, которые различаются по формам и форматам обучения, объему преподаваемых знаний и срокам обучения, закрывая потребности отрасли, в том числе и по цифровым компетенциям, технологиям информационного моделирования.

Линейка программных продуктов управленческого блока закрывает потребности в обучении ИТР и руководителей среднего звена для развития квалифицированных управленческих кадров в строительстве и формирования кадрового резерва.

Совместные программы с представителями строи-

тельных организаций формируются на регулярной основе. Для расширения портфеля таких программ ведется системная работа с членами попечительского совета НИУ МГСУ.

Центр дополнительного профессионального образования (ЦДПО) НИУ МГСУ приглашает получить дополнительную квалификацию в рамках следующих программ:

1. «Проектирование, строительство и реконструкция гидротехнических сооружений специального назначения». Форма обучения: заочная. Трудоемкость обучения: 72 ак. ч. Стоимость обучения: 24 000 р.
2. «Проектирование, строительство, эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений в районах распространения многолетнемерзлых грунтов». Форма обучения: заочная. Трудоемкость обучения: 72 ак. ч. Стоимость обучения: 24 000 р.
3. «Безопасность гидротехнических сооружений». Форма обучения: очно-заочная. Трудоемкость обучения: 72 ак. ч. Стоимость обучения: 28 000 р.
4. «Капитальное строительство, реконструкция, модернизация объектов использования атомной энергии. Основные положения». Форма обучения: очно-заочная. Трудоемкость обучения: 72 ак. ч. Стоимость обучения: 32 500 р.
5. «Морские гидротехнические сооружения». Форма обучения: очно-заочная. Трудоемкость обучения: 72 ак. ч. Стоимость обучения: 28 000 р.

Наши контакты

Адрес: 129337 Москва, Ярославское ш., 26, 8-й этаж ректората, ком. 807.

Проезд: до станции м. ВДНХ, далее автобусами 172, 244, 136, троллейбусом 76, маршрутными такси 76, 144, 244, 344 до остановки «ул. Вешних вод» (выйдя из транспорта, вы сразу же увидите комплекс НИУ МГСУ с 22-этажным зданием ректората).

Тел.: +7 (495) 783-86-39, 8 (495) 287-49-14 (доб. 2412, 2415, 2495, 1334), e-mail: cdpo@mgsu.ru.

Сайт: www.dpo.mgsu.ru

Формирование средозащитных объектов городской среды для условий жаркого и влажного климата

Минь Туан ЛЕ (Вьетнам), аспирант, e-mail: architect290587@gmail.com

Наталья Владимировна БАКАЕВА, доктор технических наук, профессор, e-mail: natbak@mail.ru

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. Преобладание высокой температуры в городе или городских островов тепла в летний период приводит к таким последствиям, как высокое потребление энергии зданиями для охлаждения и тепловой стресс у человека, способствующий снижению производительности труда, увеличению заболеваемости и смертности людей. В новых городских районах необходимо создание систем охлаждения атмосферного воздуха. По всему миру, преимущественно в «умных городах», для охлаждения городского воздуха успешно применяют систему распыления воды и организацию искусственных водных объектов (озер и т. д.), а также используют зеленые насаждения. Однако оценить охлаждающий потенциал таких систем довольно сложно. Взаимосвязь размеров водного объекта и климатических параметров (скорость ветра, температура и относительная влажность воздуха) смоделирована и проанализирована с помощью компьютерной программы. В данной работе представлены расчеты с использованием метода вычислительной гидрогазодинамики, основанные на усредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье–Стокса, для оценки охлаждающего потенциала системы распыления воды и системы искусственных водных объектов. Результаты моделирования показали, что размер водного объекта оказывает значительное влияние на микроклимат городской территории в летний сезон в условиях жаркого и влажного климата Вьетнама. Использование водоемов и фонтанов в сочетании с конвективным теплообменом не только создает более прохладные зоны, но и значительно усиливает охлаждающий эффект в ветреных зонах. Изучение влияния таких факторов, как городской растительный покров и водное пространство, на смягчение эффекта городских тепловых островов в крупных городах и мегаполисах крайне актуально.

Ключевые слова: микроклимат, городской остров тепла, городской ветер, озеленение, городское планирование, тепловой комфорт, городская тепловая среда, водный объект.

THE FORMATION OF ENVIRONMENTAL PROTECTION OBJECTS OF THE URBAN ENVIRONMENT FOR HOT AND HUMID CLIMATE CONDITIONS

Minh Tuan LE (Vietnam), e-mail: architect290587@gmail.com

Natalya V. BAKAEVA, e-mail: natbak@mail.ru

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

Abstract. The predominance of high temperatures in the city or urban heat islands in the summer period leads to such consequences as high energy consumption by buildings for cooling and heat stress in humans, contributing to a decrease in labor productivity, an increase in morbidity and mortality of people. In new urban areas, it is necessary to create urban air cooling systems. All over the world, mainly in "smart cities", a water spray system and the organization of artificial water bodies (lakes, etc.) are successfully used to cool the urban air, and green spaces are also used. However, assessing the cooling potential of such systems is difficult. The relationship between the size of the water object and climate parameters such as wind speed, air temperature, relative humidity is modeled and analyzed with the help of a computer program. This paper presents calculations with the use of the method of computational hydro-gas dynamics, based on the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, to estimate the cooling potential of a water spray system and a system of artificial water bodies. The simulation results showed that the size of the water body has a significant impact on the microclimate of the urban area in the summer season in the hot and humid climate of Vietnam. The use of fountains in combination with convective heat exchange not only creates cooler areas, but also greatly enhances the cooling effect in windy areas. The study of the influence of factors such as urban vegetation cover and water space on the mitigation of the effect of urban heat islands in large cities and megacities is extremely relevant

Key words: micro-climate, urban heat island, urban wind, landscaping, urban planning, thermal comfort, urban thermal environment, water body.

Введение

В настоящее время в городах проживает более половины населения земли, что наряду с раз-

личными видами деятельности создает большую нагрузку на природную среду. Современные модели урбанизации характери-

зуются значительными преобразованиями природного рельефа, изменениями тепловых (главным образом радиационных), влаж-

ностных и динамических свойств окружающей среды, что приводит к новому техногенному микроклимату. Это новое изменение климата обусловлено эффектом городского теплового острова (ГОТ) [1–4], которое значительно влияет на окружающую среду, приводя к таким экономическим и социальным последствиям, как высокое потребление энергии зданием для охлаждения и тепловой стресс у человека [5].

Озеленение городских территорий в комплексе с другими мерами по адаптации к изменению климата может быть использовано для снижения высокой температуры в городских районах благодаря повышению способности поверхностей отражать коротковолновое тепловое излучение, а также испарительному охлаждению [6–8]. Среди предлагаемых мер также все большее распространение получают системы распыления воды и искусственные водные объекты для испарительного охлаждения [9], которые могут быть эффективным инструментом для улучшения теплового комфорта как в помещении, так и на открытом воздухе. Искусственные водные объекты имеют такие физические свойства, как площадь, глубина и форма. Например, увеличение площади водной поверхности приводит к повышению площади испарения, что, в свою очередь, увеличивает потенциальный теплообмен между водой и атмосферой [10].

Численное моделирование с использованием метода вычислительной гидрогазодинамики (CFD) может быть полезным инструментом для оценки методов охлаждения воздуха в городе. В последние 50 лет применение этого метода для оценки городской метеорологии и микроклимата получило значительное развитие и распространение [11–14].

Цель данного исследования —

анализ и сравнение результатов моделирования микроклимата в районе г. Ханоя (Вьетнам) с высокой плотностью застройки для снижения эффекта городского теплового острова с помощью устройства искусственного водного объекта (озера) в сочетании с системой распыления воды при обеспечении благоприятных условий жизнедеятельности и разработки эффективных решений по охлаждению городского воздуха.

Материалы и методы исследования

Теоретическую базу исследования составляют закономерности изменчивости микроклиматических условий городской среды от средозащитных факторов [15, 16]. Например, получившая широкое применение для решения прикладных задач климатологического и экологического мониторинга городской среды, в том числе задачи оптимального городского планирования, физико-математическая модель микроклимата [17], которая позволяет оценивать термические условия и режим увлажнения городских ландшафтов, а также процессы тепло- и влагообмена в среднесуточном масштабе осреднения.

Особый интерес представляет исследование Т. Р. Оке, в котором представлено математическое уравнение, описывающее температурную разницу между городом и окружающей средой. Кроме того, он изучал влияние морфологии застройки, которая в значительной степени определяет воздушный поток (вентиляцию), приток солнечного излучения, затенение и другие параметры, влияющие на состояние городского микроклимата. Так, в работе [18] Т. Р. Оке использовал отношение высоты к ширине (B/W) уличных каньонов, чтобы разделить ветровой поток на три режима: с изолированной шероховатостью, с ин-

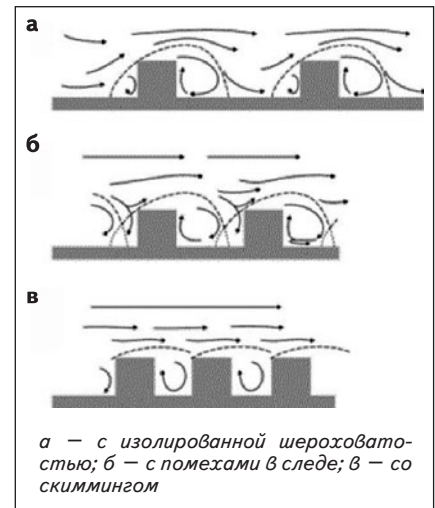


Рис. 1. Режимы течения потоков [17]

терференцией следа и поток скимминга. В первом случае здания расположены относительно широко ($B/W < 0,3$), а другие здания не влияют на поток вокруг них, т. е. если бы они в совокупности были изолированными препятствиями (рис. 1а).

По мере того как расстояние от здания к зданию увеличивается с подветренной стороны, эффект укрытия уменьшается, и в конечном итоге струя воздуха сливается с потоком и принимает невозмущенную форму. Следовательно, в изолированном потоке неровностей ожидается увеличение скорости ветра за зданием. В случае, когда интервал между зданиями средний ($0,3 < B/W < 0,7$), предыдущая зона здания с подветренной стороны пересекается с последующей зоной остановки ветра напротив следующего здания с подветренной стороны. Это называется потоком помех в спутной струе (рис. 1б).

При меньшем расстоянии между зданиями ($B/W < 0,7$) основной поток начинает скользить по крышам, вызывая вихрь в полости между зданиями (рис. 1в). В этой ситуации основная часть потока с трудом проходит внутрь уличного каньона.

В городских районах созда-

ние зоны с низкой скоростью ветра определяет качество и уровень комфорта человека. Чтобы смягчить воздушный поток над городским ландшафтом или вокруг зданий, можно комбинировать растения с формами рельефа (рис. 2).

Изменчивость микроклимата городской среды, в частности ветрового режима, зависит от выбора разных видов растений до взаимного расположения деревьев. Различные комбинации деревьев и кустарников могут использоваться для направления, уменьшения и отклонения ветра или увеличения ветрового воздушного потока со значительным ударом (рис. 3).

Дерево как препятствие обычно снижает скорость ветра, что приводит к уменьшению скорости термодинамического обмена в слоях воздуха, позволяя преобладать более высоким температурам в защищаемой зоне. Существует небольшая разница между фактической температурой воздуха на солнце или в тени, если это особые условия со свободным движением воздуха. Естественные преграды, разрушаемые ветром с низкой скоростью, такие как деревья и кустарники, часто предпочтительнее искусственных преград (зданий), поскольку они не создают такой сильной турбулентности на нижней стороне потока.

Основные рекомендации по ландшафтному дизайну для создания эффективной и высококачественной среды в городских районах иллюстрирует рис. 4.

В качестве объекта исследования был принят городской микрорайон Ван Фу в центре г. Ханоя с населением 20 000 человек и площадью 94,1 га (рис. 5). Улично-дорожная сеть составляет 34,4 % общей площади микрорайона. На исследуемой территории расположены офисные здания высотой 36–40 этажей и

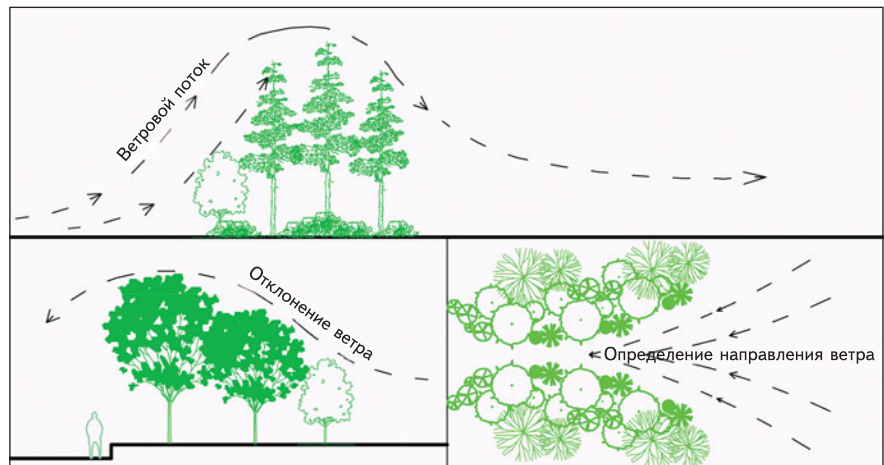


Рис. 2. Функции деревьев и кустарников в сдерживании ветров

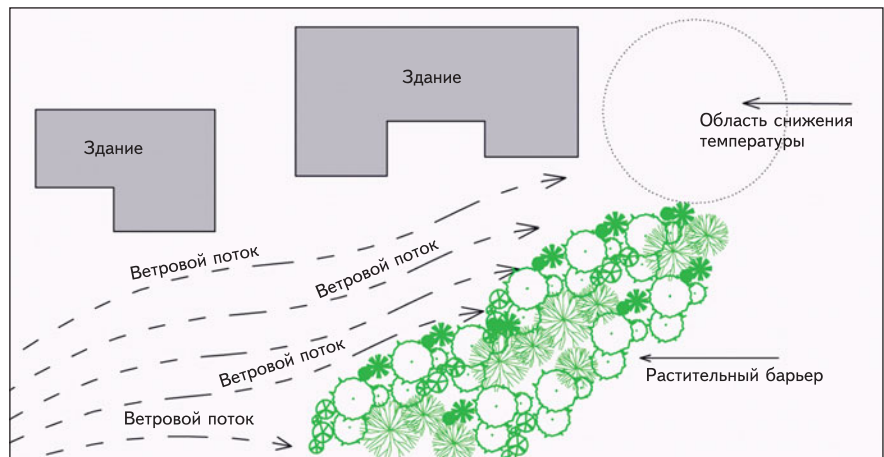


Рис. 3. Изменение направления ветра для снижения температуры воздуха [3]

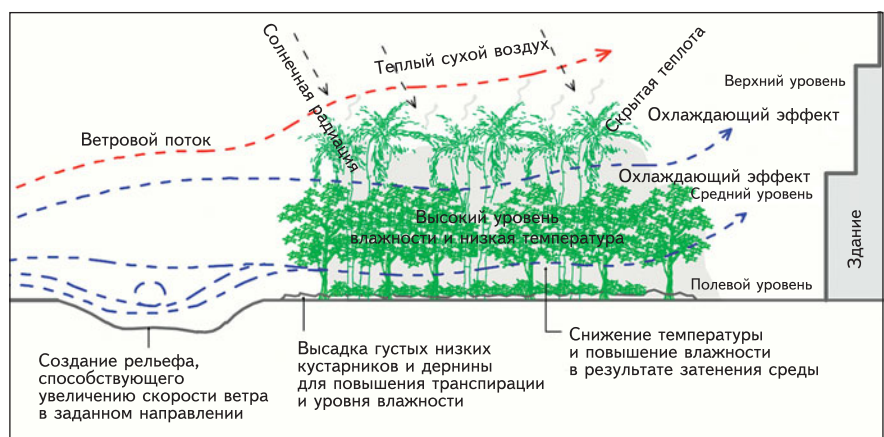


Рис. 4. Схема процесса модификации четырех компонентов микроклимата [3]

жилые кварталы со зданиями высотой 4–5 этажей. В целом территория характеризуется небольшим количеством растительности, узкими улицами, примыка-

ющими к автомагистралям с большой плотностью движения — источникам загрязняющих веществ.

Район исследования находится на юго-западе г. Ханоя, с дол-

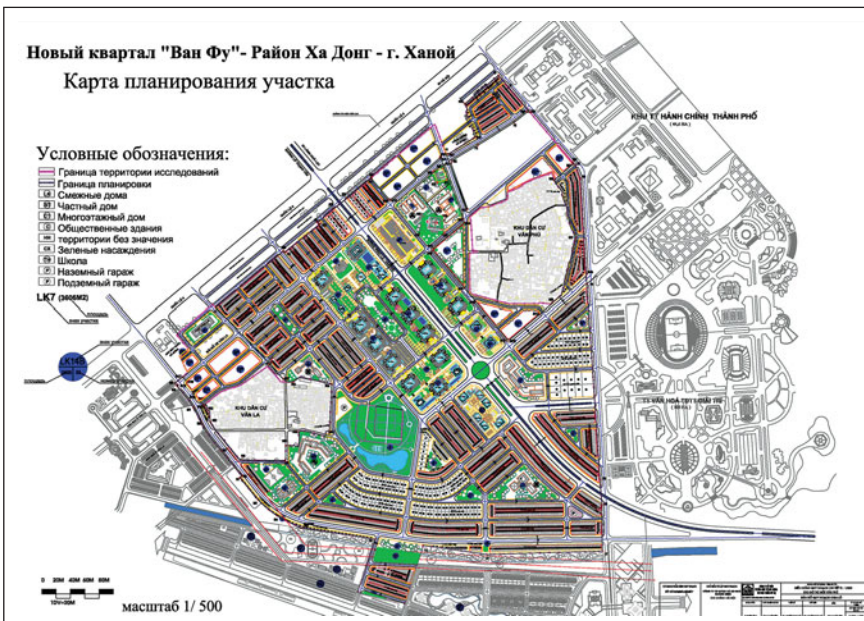


Рис. 5. Территория исследования

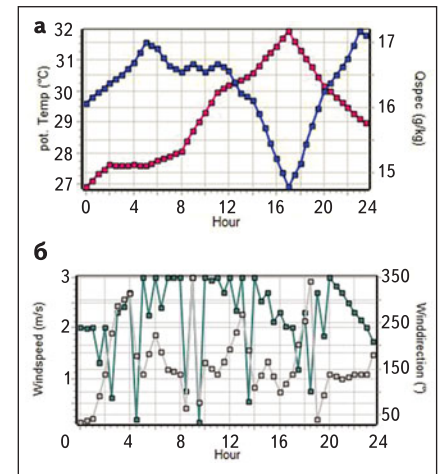


Рис. 6. Температура воздуха (а) и скорость ветра (б), данные метеостанции на 29 мая 2019 г.

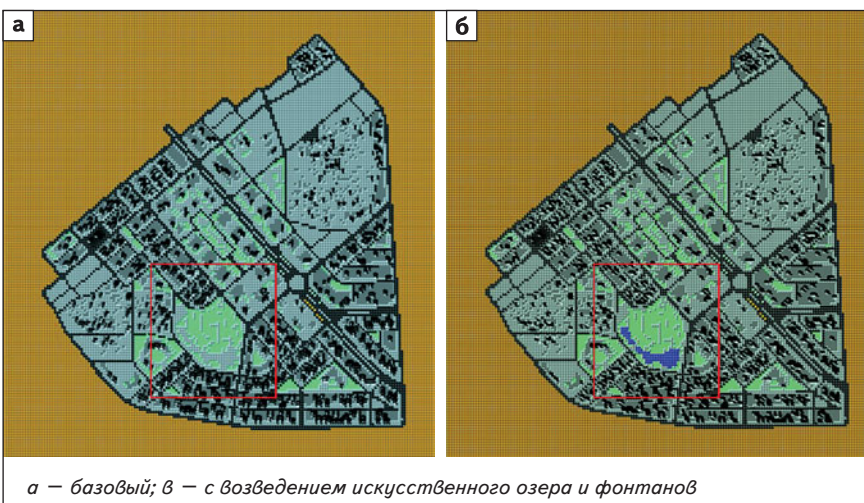


Рис. 7. Исследуемые сценарии в квартале Ван Фу, г. Ханой

готой $20,96^\circ$ и широтой $105,76^\circ$. Климат Ханоя тропический, характеризуется жарким и влажным летом. В течение типичного летнего дня температура воздуха может колебаться от $27,8$ до 32°C (рис. 6). При этом зачастую отмечаются чрезвычайно жаркие дни с температурой воздуха выше 40°C . В городской среде этот температурный режим может даже усугубляться в связи с нагревом дорожного покрытия и, как следствие, повышением температуры окружающего воздуха.

В связи с нелинейностью и сложностью климатэнергетических явлений в городских пространствах построение динамической цифровой модели позволяет провести сравнительный анализ эффективности предлагаемых сценариев. В работе использована программа для моделирования микроклимата в городе ENVI-met, которая воссоздает городскую климатическую систему. ENVI-met выполняет одновременное и интерактивное вычисление радиационного, теплового

и гидравлического баланса, а также аэродинамики в городских пространствах в различном масштабе.

При моделировании в программной среде ENVI-met с применением метода вычислительной гидрогазодинамики (CFD) проводили расчет течения воздушных потоков, влияния растительности и водных объектов на микроклимат, теплообмена между грунтом и стенами зданий и рассеивания загрязняющих веществ. Однако программное обеспечение ENVI-met имеет два важных недостатка: оно не позволяет моделировать энергообменные процессы внутри самих зданий, и время расчета сложных задач становится слишком большим (моделирование 24-часового периода климатических процессов, происходящих в сложной городской обстановке, составляет более 15 дней при использовании мощного компьютера). Несмотря на эти недостатки, ENVI-met до сих пор остается одним из немногих программных средств в мире, позволяющих реалистично моделировать микроклимат. Программное обеспечение предназначено для моделирования в масштабе городской застройки с горизонталь-

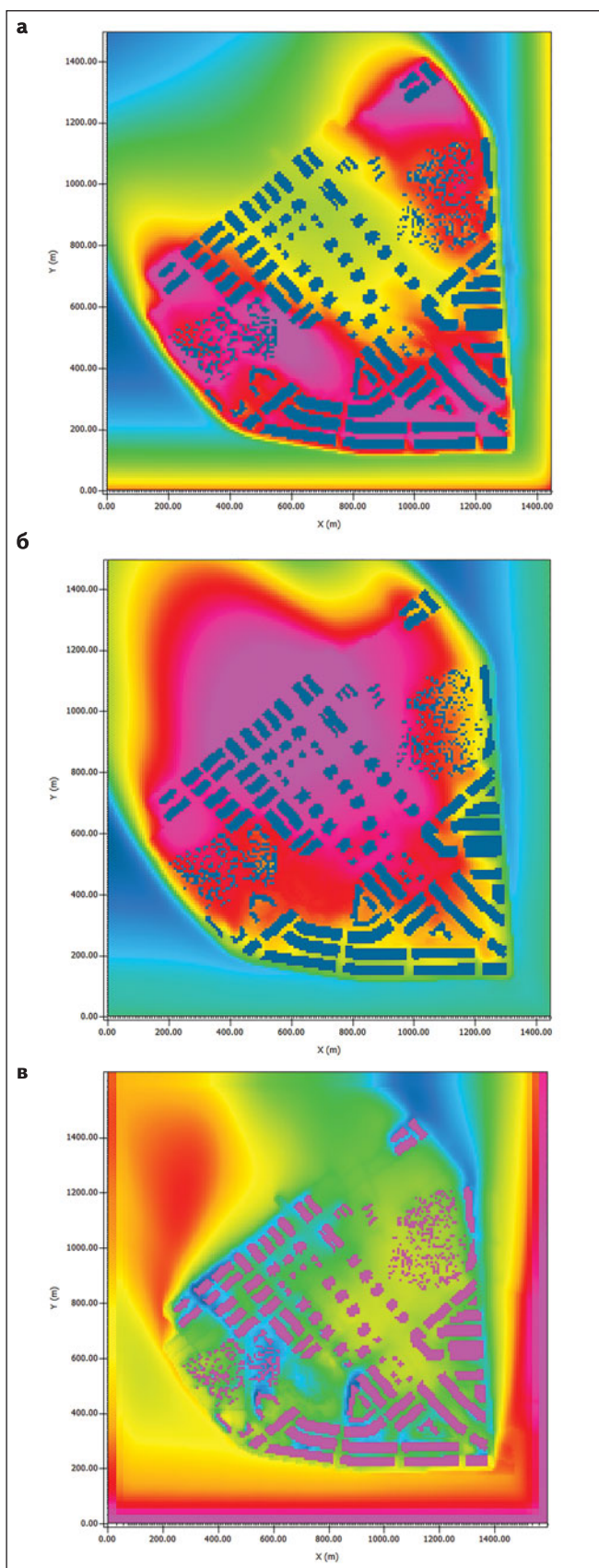


Рис. 8. Карта распределения температуры воздуха днем в 12 ч (а) и ночью в 23 ч (б), разница температур при возведении водных объектов (в)

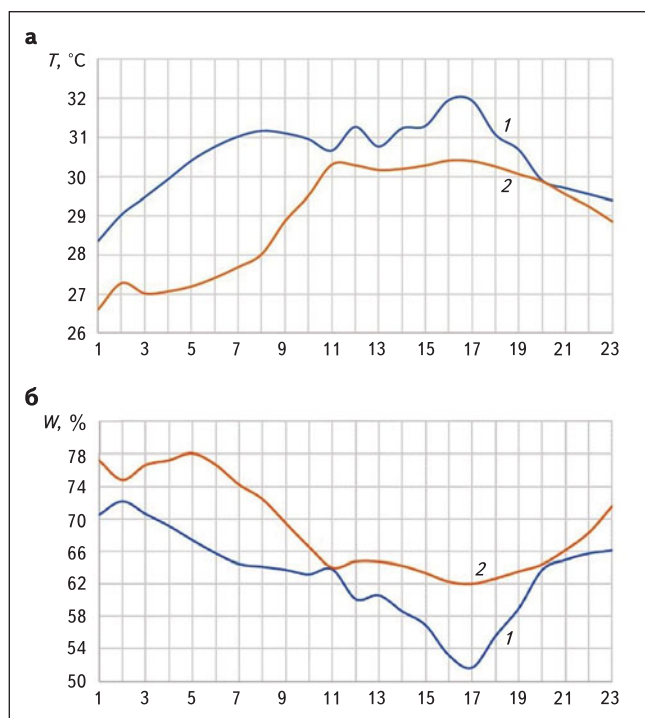


Рис. 9. Температура T (а) и влажность W (б) воздуха базового сценария (1) и сценария с организацией искусственных озер и фонтанов (2) в квартале Ван Фу г. Ханоя, модель рассчитана в течение 24 ч

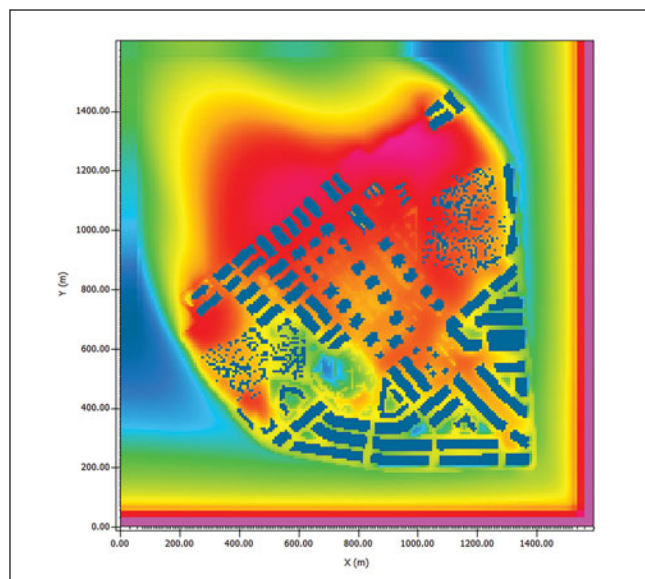


Рис. 10. Карта температуры воздуха для исследуемой территории в 23 ч при использовании искусственного озера и фонтанов

ным разрешением сетки от 0,5 до 10 м и периодом времени до 24 ч с шагом от 1 до 5 с. Это разрешение позволяет анализировать маломасштабные взаимодействия [19]. Модель городской территории, выбранной для исследования, имеет размеры элементов сетки $187 \times 192 \times 35$ с шагом 8 м. Сценарий текущего состояния и сценарий с возведением

Микроклиматические условия и интенсивность теплового излучения в рабочей зоне*

| Вид труда | Диапазон температур воздуха, °С | Влажность воздуха, % | Скорость ветра, м/с | Интенсивность теплового излучения в зависимости от площади контакта, Вт/м ² |
|-----------|---------------------------------|----------------------|---------------------|--|
| Легкий | 20–34 | 40–80 | 0,1–1,5 | 35 – при воздействии на 50 % площади тела человека; |
| Средний | 18–32 | | 0,2–1,5 | 70 – при облучении 25–50 % площади тела человека; |
| Тяжелый | 16–30 | | 0,3–1,5 | 100 – при облучении менее 25 % поверхности тела человека |

* По данным документа CVN 5508:2009 «Воздух рабочей зоны. Требования к условиям микроклимата и методам».

искусственного озера и фонтанов показаны на *рис. 7*.

Для начала динамического расчета городского микроклимата необходимо определить граничные условия модели. В качестве входных данных цифровой модели применяли метеорологические данные, записанные на метеостанции в районе Ха-Донг. Для анализа были рассмотрены еженедельные погодные данные за май 2019 г. При расчете скорости и направления ветра учитывали средние значения, зафиксированные метеостанцией на земле. Далее с помощью простой логарифмической интерполяции в пространстве и линейной во времени определяли вертикальный одномерный профиль ветра, который служил граничными условиями для боковых поверхностей 3D-моделей. Направление ветра поддерживали постоянным на всех уровнях, влажность атмосферы интерполировали линейно по наблюдаемым данным на земле.

Результаты и обсуждения

Эффект городского острова тепла наблюдается в течение всего года как днем, так и ночью, его интенсивность зависит от типа и состава городских поверхностей. Разница в температуре воздуха в городских и сельских районах часто бывает наибольшей в ясные вечера, так как воз-

дух в сельских районах быстрее охлаждается, чем в городах, где большая часть тепла аккумулируется в зданиях и на городских дорогах.

На тепловой карте городского квартала Ван Фу, смоделированной в программе ENVI-met, показана разница температур воздуха днем и ночью. Более высокая температура воздуха была зафиксирована над асфальтированными дорогами вокруг жилых и общественных зон (*рис. 8а*).

Созданные водные объекты позволяют сформировать прохладные и влажные зоны, с понижением температуры на 2,87° на исследуемой территории и вокруг жилого района (*рис. 8б*). Вследствие того, что основное направление ветра юго-восточное (от озера к жилой застройке), ветер способствует снижению температуры на большей части рассматриваемой территории.

Результаты моделирования базового сценария показывают, что 29 мая 2019 г. в 16 ч температура воздуха достигла самого высокого значения 31,964 °С, в то время как при организации искусственного озера и фонтана составляла 30,401 °С (*рис. 9а*). Таким образом, применение искусственных озер и фонтанов в городском пространстве Ван Фу площадью 6088 м² помогло снизить температуру воздуха на

1,563° в самую жаркую часть дня.

При использовании метода охлаждения искусственными озерами и фонтанами возникает испарение воды на открытой поверхности, что увеличивает влажность воздуха. Так, в 16 ч в базовом сценарии влажность воздуха достигает 53,164 %, а в случае использования озера и фонтана – 62,253 % (*рис. 9б*). Испарение воды с открытых акваторий может снизить температуру, но, с другой стороны, также увеличить влажность, что сокращает положительное влияние на тепловой комфорт.

Сравнение результатов моделирования варианта с искусственным озером и фонтаном показало, что температура в дневное время суток (с 8 до 18 ч) находится в диапазоне 28–30, а влажность воздуха около 62–72 %, что соответствует нормативным требованиям Вьетнама.

На *рис. 10* хорошо видно, что участки вблизи водных объектов имеют более низкую температуру воздуха и более высокую относительную влажность по сравнению с окружающими территориями в городе. Однако водные объекты оказывают значительное влияние на температуру и влажность воздуха в пределах 1–2 м от акватории. Поэтому можно сделать вывод, что испарительное охлаждение с поверхности водных объектов оказывает влияние и на соседние пространства.

Неблагоприятные условия жизнедеятельности, связанные с выполнением различной работы, можно охарактеризовать следующими данными (*см. таблицу*).

Выводы

1. Несмотря на значительное количество научных исследований, все еще существует проблема определения влияния конкретных предпринятых меропри-

ятий на эффект городского теплового острова в дневное и ночное время. Изучение влияния таких факторов, как городской растительный покров и водное пространство, на смягчение эффекта городских тепловых ощущений — важная задача для улучшения качества среды жизнедеятельности человека, эколо-

гического баланса и архитектурно-ландшафтной организации жилого района. Кроме того, создание зеленых насаждений и искусственных водных объектов в новых городских районах определяет процесс градостроительного планирования и благоустройства территории с учетом микроклиматических факторов.

2. Результаты моделирования показали изменчивость микроклимата в жилом районе г. Ханоя под влиянием средозащитных факторов: искусственного водного объекта (озера) в сочетании с системой распыления воды в воздухе и озеленения. Температура окружающего воздуха может быть понижена на 1–1,5 °С.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Oke T. R. The energetic basis of the urban heat island [Энергетическая основа городского острова тепла]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological*, 1982, no. 108, pp. 1–24. DOI: doi.org/10.1002/cj.49710845502.
- Ле М. Т., Алексашина В. В. Влияние эффекта острова тепла на экологию мегаполиса // Проблемы региональной экологии. 2018. № 5. С. 36–40.
- Le M. T., Aleksashina V. V. The influence of the heat island effect on the ecology of the metropolis. *Problemy regionalnoy ekologii*, 2018, no. 5, pp. 36–40. (In Russian).
- Ле М. Т. Влияние планировки города на возникновение островов тепла в мегаполисах с тропическим климатом (г. Ханой) // Вестник МГСУ. 2019. № 2(125). С. 148–157.
- Le M. T. The Influence of city planning on the emergence of heat islands in megacities with a tropical climate (Hanoi). *Vestnik MGSU*, 2019, no. 2(125), pp. 148–157. (In Russian).
- Le Minh Tuan, Thi Anh Tuyet Cao, Nguyen Anh Quan Tran. The role of green space in the urbanization of Hanoi city [Роль зеленых насаждений в урбанизации города Ханоя]. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 97, pp. 01013.
- Ле М. Т., Алексашина В. В. Проблемы градостроительства в условиях тропического климата (на примере города Ханоя) // Сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. М., 2018. С. 183–187.
- Le M. T., Aleksashina V. V. Urban planning problems in a tropical climate (for example, the city of Hanoi). *Sbornik докладov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Collection of reports of the international scientific and practical conference]. Moscow, 2018, pp. 183–187. (In Russian).
- Gromke C., Blocken B., Janssen W. et al. CFD analysis of transpirational cooling by vegetation: Case study for specific meteorological conditions during a heat wave in Arnhem, Netherlands [CFD-анализ транспирационного охлаждения растительностью: тематическое исследование для конкретных метеорологических условий во время жары в Арнеме, Нидерланды]. *Building and Environment*, 2015, vol. 83, pp. 11–26.
- Rizwan A. M., Dennis L. Y., Chunho L. I. U. A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island [Обзор создания, определения и смягчения последствий городского теплового острова]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, no. 20, pp. 120–128.
- Le Minh Tuan, Nguyen Anh Quan Tran. Features of the formation of urban heat islands effects in tropical climates and their impact on the ecology of the city [Особенности формирования эффектов городских тепловых островов в тропическом климате и их влияние на экологию города]. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 91, pp. 05005.
- Huang C., Ye D., Zhao H. et al. The research and application of spray cooling technology in Shanghai Expo [Исследование и применение технологии охлаждения распылением на выставке в Шанхае]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, no. 31, pp. 3726–3735.
- Zeng Z., Zhou X., Li L. The impact of water on microclimate in Lingnan Area [Влияние воды на микроклимат в районе Линнань]. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 205, pp. 2034–2040.
- Blocken B. 50 years of computational wind engineering: past, present and future [50 лет вычислительной ветроэнергетики: прошлое, настоящее и будущее]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014, no. 129, pp. 69–102.
- Ле М. Т., Шукуров И. С., Нгуен Т. М. Исследование интенсивности городского острова тепла на основе городской планировки // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 3(33). С. 1–22.
- Le M. T., Shukurov I. S., Nguyen T. M. A study case of urban heat island intensity based on urban geometry. *Stroitelstvo: nauka i obrazovaniye*, 2019, vol. 9, iss. 3(33), pp. 1–22.
- Le M. T., Shukurov I., Shukurova L., Dmitrieva A. A study case of mathematical calculation of urban heat island intensity based on urban geometry [Пример исследования математического расчета интенсивности городского теплового острова на основе городской геометрии]. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2019, 2020, no. 70, pp. 373–388.
- Ле М. Т., Шукуров И. С., Гельманова М., Слесарев М. Ю. Расчет интенсивности теплового острова в мегаполисах с помощью моделирования в программе ENVI-met // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 9. С. 1262–1273.
- Le M. T., Shukurov I. S., Gelmanova M., Slesarev M. Yu. Using Envi-met simulation as a tool to calculator

- intensity urban heat island in megacities. *Vestnik MGSU*, 2020, vol. 15(9), pp. 1262–1273. (In Russian).
15. Brown R. D., Gillespie T. J. *Microclimate landscape design: creating thermal comfort and energy efficiency* [Ландшафтный дизайн микроклимата: создание теплового комфорта и энергоэффективности]. New York, John Wiley & Sons Publ., 1995. 208 p.
 16. Shahidan M. F., Mustafa K. M. S. Tropical microclimate indicators for the malaysian urban landscape [Показатели тропического микроклимата для городского ландшафта Малайзии]. *ASEAN Postgraduate Seminar in Built Environment*, University of Malaya, Malaysia, 2005, pp. 1–9.
 17. Кислов А. В., Константинов П. И. Детализированное пространственное моделирование температуры Московского мегаполиса. // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 5. С. 25–32.
 17. Kislov A. V., Konstantinov P. I. Detailed spatial modeling of the temperature of the Moscow metropolis. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2011, no. 5, pp. 25–32. (In Russian).
 18. Nakamura Y., Oke T. R. Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon [Ветер, температура и условия стабильности в городском каньоне, ориентированном с востока на запад]. *Atmospheric Environment*, 1988, no. 22, pp. 2691–2700.
 19. Bruse M. Numerical modeling of the urban climate – a preview on ENVI-met 4.0 [Численное моделирование городского климата – превью на ENVI-met 4.0]. *7th International Conference on Urban Climate. Proceedings*. ICUC 2009. Yokohama, Japan, 2009.

Для цитирования: Ле М. Т., Бакаева Н. В. Формирование средозащитных объектов городской среды для условий жаркого и влажного климата // *Промышленное и гражданское строительство*. 2021. № 9. С. 52–59. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.52-59.

For citation: Le M. T., Bakaeva N. V. The Formation of Environmental Protection Objects of the Urban Environment for Hot and Humid Climate Conditions. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo* [Industrial and Civil Engineering], 2021, no. 9, pp. 52–59. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.52-59. ■

ПОЗДРАВЛЕНИЕ С. И. ЛЁВКИНУ



Члену редколлегии журнала «Промышленное и гражданское строительство», руководителю Департамента градостроительной политики г. Москвы, доктору менеджмента, заслуженному строителю РФ, почетному строителю России и Москвы Сергею Ивановичу Лёвкину исполняется 60 лет.

После окончания в 1983 г. Ленинградского высшего военного инженерного строительного Краснознаменного училища им. А. А. Комаровского по специальности «Строительство зданий и сооружений» и в 2005 г.

Американского университета управления по специальности «Финансы» с присвоением ученой степени доктора менеджмента С. И. Лёвкин непрерывно трудится в строительной сфере. В 1983–2005 гг. – начальник СМУ, начальник ПТО, главный инженер, начальник УНР, начальник ВСУ, генеральный директор ОАО «ВСУМ» (Военно-строительное управление г. Москвы); в 2006–2009 гг. – руководитель Управления проектов и программ, начальник Управления по организации и развитию инфраструктуры особых экономических зон Минэкономразвития России; генеральный директор ОАО «Особые экономические зоны». Свое 60-летие С. И. Лёвкин встречает на посту руководителя Департамента градостроительной политики г. Москвы.

Профессионализм и творческая энергия, доброе и внимательное отношение к людям снискали Сергею Ивановичу глубокое уважение и высокий авторитет коллег.

Его заслуги в развитии особых экономических зон в РФ и строительного комплекса Москвы и области, проведении государственной экономической политики отмечены Почетной грамотой правительства РФ, орденом Почета, знаком отличия «За безупречную службу городу Москве», многими грамотами и дипломами.

Редколлегия и редакция журнала «Промышленное и гражданское строительство» от всей души поздравляют уважаемого Сергея Ивановича с юбилеем и желают ему доброго здоровья, новых профессиональных успехов, удачи и благополучия на долгие годы.

Выбор аварийных ситуаций при расчете на прогрессирующее обрушение промышленного здания

Ольга Александровна ТУСНИНА, кандидат технических наук, доцент, e-mail: tusninaoa@mgsu.ru

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. Рассмотрены проблемы расчета на прогрессирующее обрушение стальных каркасов одноэтажных промышленных зданий. Назначать аварийные ситуации при расчете каркаса таких зданий необходимо с учетом вероятности их возникновения. В этой связи при выборе аварийных ситуаций следует принимать во внимание особенности технологического процесса, протекающего в здании, конструктивные и организационные мероприятия, направленные на предотвращение возникновения аварийных ситуаций, а также напряженно-деформированное состояние конструкций. Некорректный выбор аварийных ситуаций может привести к небезопасному проектированию, а также нецелесообразному усилению каркаса. В своде правил «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения» указано, что для одноэтажного промышленного здания следует рассматривать разрушение колонны, включая угловую и рядовую. В статье выполнен анализ напряженно-деформированного состояния конструкций каркаса действующего реконструируемого цеха, обращено внимание на нецелесообразность рассмотрения вариантов разрушения сквозной колонны целиком, а также обоснован выбор аварийной ситуации, связанной с разрушением одной из ветвей колонн с сохранением несущей способности другой ветви.

Ключевые слова: прогрессирующее обрушение, одноэтажное промышленное здание, стальной каркас, пространственная работа, рядовая и угловая колонны, аварийные ситуации.

THE CHOICE OF EMERGENCY SITUATIONS WHEN CALCULATING THE PROGRESSIVE COLLAPSE OF AN INDUSTRIAL BUILDING

Olga A. TUSNINA, e-mail: tusninaoa@mgsu.ru

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

Abstract. The problems of calculating the progressive collapse of steel frames of single-storey industrial buildings are considered. It is necessary to designate emergency situations when calculating the frame of such buildings, taking into account the probability of their occurrence. In this regard, when choosing emergency situations, it is necessary to take into account the features of the technological process taking place in the building, structural and organizational measures aimed at preventing the occurrence of emergency situations, as well as the stress-strain state of structures. Incorrect choice of emergency situations can lead to unsafe design, as well as inappropriate reinforcement of the frame. The Code of Rules "Protection of buildings and structures against progressive collapse" states that for a one-storey industrial building, the destruction of a column, including a corner and a row, should be considered. The article analyzes the stress-strain state of the frame structures of the existing reconstructed shop, draws attention to the inexpediency of considering the options for the destruction of the through column as a whole, and also justifies the choice of an emergency situation associated with the destruction of one of the branches of the columns while preserving the bearing capacity of the other branch.

Key words: progressive collapse, one-storey industrial building, steel frame, spatial work, row and corner columns, emergency situations.

Строительство промышленных зданий в советское время широко велось на всей территории России. Однако сегодня с учетом развития технологий и модернизации производства часто возникает необходимость в проведении реконструкции промышленных объектов различного назначения, построенных по «старым» нормам без расчета на прогрессирующее обрушение.

Расчет несущих конструкций производственного здания на устойчивость к прогрессирующему обрушению в соответствии с ГОСТ 27751–2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения» и п. 5.1 СП 56.13330.2011 «СНиП 31-03-2001 Производственные здания» выполняется для зданий повышенного (КС-3) и нормального (КС-2) уровня ответственно-

сти с массовым нахождением людей.

Наибольшее количество промышленных зданий попадают в категорию сооружений повышенного уровня ответственности, по причине принадлежности протекающих в них технологических процессов к особо опасным, поэтому при их реконструкции необходимо выполнять расчет на прогрессирующее обрушение.

Расчет на устойчивость к прогрессирующему обрушению позволяет проверить живучесть каркаса и должен исключить лавинообразный выход из строя несущих конструкций при локальном повреждении какого-либо несущего конструктивного элемента (в соответствии с п. 3.9 СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения»). Место и степень локального повреждения конструктивного элемента определяются с учетом объемно-планировочного и конструктивного решения здания, а также особенностей его эксплуатации.

Как показывает практика, каркасы промышленных зданий достаточно устойчивы к прогрессирующему обрушению за счет наличия большого количества связей, фахверка, ограждающих и других вспомогательных конструкций, являющихся нерабочими при нормальной эксплуатации, но активно включающимися в работу при локальных повреждениях каркаса [1]. Следует отметить, что проблема обеспечения устойчивости каркасов к прогрессирующему обрушению достаточно современная [2–4].

Большое количество теоретических [5–8] и экспериментальных [9, 10] исследований отечественных и зарубежных авторов посвящено проблеме прогрессирующего обрушения.

В работах [11–13] с использованием численных методов исследованы динамические воздействия на каркас при локальном разрушении несущего элемента, в зависимости от промежутка времени, за которое этот элемент выходит из строя при аварийной ситуации.

В статье [14] изучается проблема обеспечения несущей способности при авариях, приводящих к повреждению конструкций, при этом рассматривается комплекс предварительных и

оперативных действий, снижающих возможные неблагоприятные последствия от разрушения отдельных элементов.

В статье [15] представлены различные мероприятия по обеспечению безопасности сооружений от прогрессирующего обрушения. В частности, рекомендуется применение специальных превентивных мер, предотвращающих вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Однако все приведенные работы посвящены проектированию нового здания. В данной статье основное внимание уделено корректности выбора аварийных сценариев в действующем реконструируемом цехе, запроектированном и построенном по «старым» нормам.

В настоящее время основным нормативным документом, регламентирующим расчет на прогрессирующее обрушение, является СП 385.1325800, в котором сформулированы аварийные сценарии для одноэтажных промышленных зданий, связанные с разрушением угловой и рядовой колонн.

В одноэтажных промышленных зданиях на стальном каркасе с мостовыми кранами колонны проектируются двухветвевыми с раскосной решеткой. Ветви в таких колоннах загружены неравномерно, и одновременное разрушение двух ветвей маловероятно. Кроме того, следует учитывать наличие на производственном объекте дополнительных конструкций, не включаемых в расчетную схему, а также реализацию мероприятий, препятствующих механическому повреждению колонны.

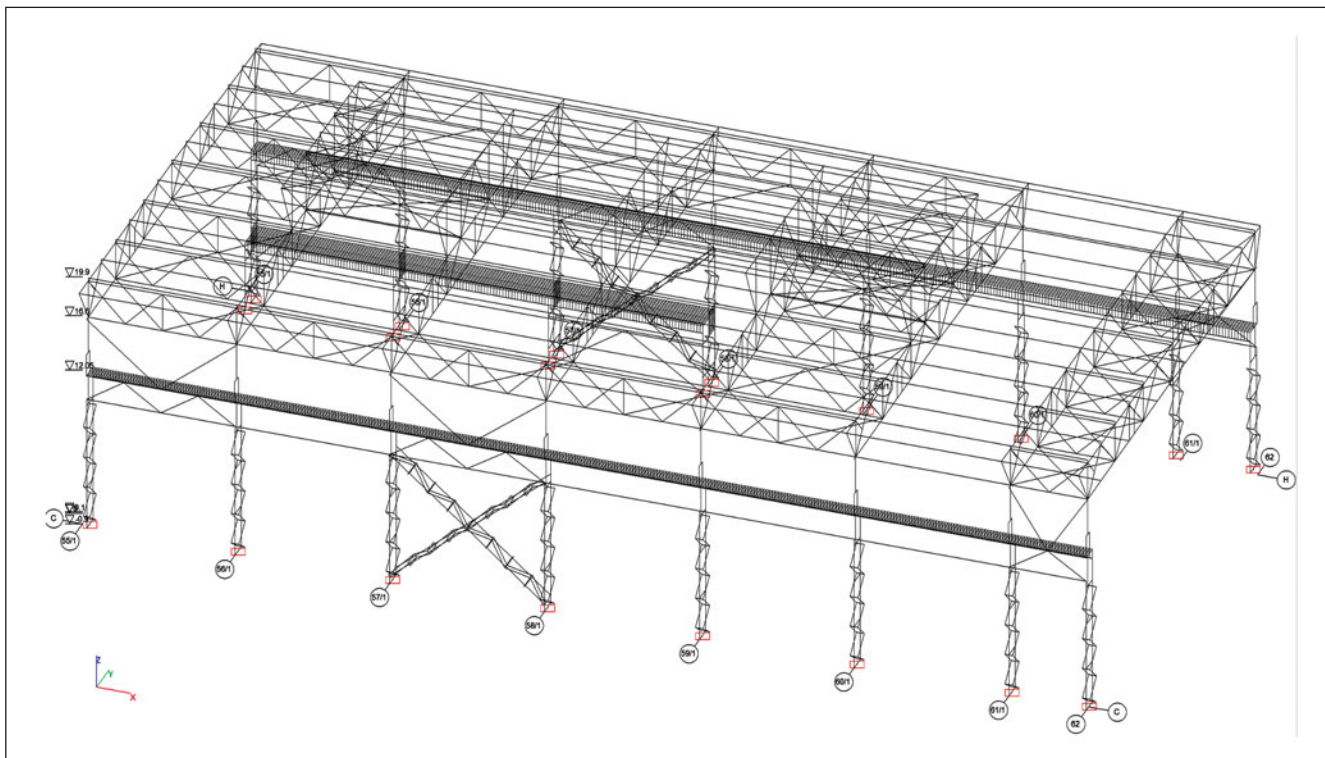
В случае одновременного разрушения обеих ветвей колонны, в особенности угловой, устойчивость каркаса промышленного здания к прогрессирующему обрушению зачастую оказывается не обеспечена.

Согласно п. 9.4 СП 385.1325800 в качестве конструктивных мероприятий рекомендуется установка продольных неразрезных связевых конструкций для перераспределения усилий и «подвешивания» к ним разрушаемой колонны. Реализация таких решений возможна, хотя и вызывает существенное повышение металлоемкости каркаса при новом проектировании, а в случае реконструкции действующего цеха могут возникнуть сложности в применении такой схемы.

В типовых каркасах имеются связи по верхним частям колонн, которые устанавливаются только в торцевых шагах и основном связевом шаге в температурном блоке. Эти связи не могут препятствовать обрушению покрытия при удалении колонны. Для обеспечения устойчивости к прогрессирующему обрушению требуется усиление всего каркаса и установка дополнительных продольных вертикальных связей по верхним частям колонн вдоль всего здания. Такое усиление весьма трудоемко и не представляется целесообразным ввиду низкой вероятности аварийной ситуации, связанной с разрушением обеих ветвей колонны одновременно.

Следует отметить, что проведение усиления в действующем эксплуатируемом цехе, тем более при безостановочном технологическом процессе, является крайне проблематичным с точки зрения как возможности размещения элементов усиления, так и их монтажа.

Кроме того, каркас за время длительной эксплуатации под нагрузками приобретает некоторые изменения геометрии (происходит смещение элементов, выработка зазоров в отверстиях для болтов, обжатие каких-либо элементов), в результате чего фактическая пространственная работа каркаса действующего цеха



Расчетная схема каркаса рассматриваемого промышленного здания

отличается от теоретической, согласно которой выполнен расчет.

На практике чаще всего используются расчетные схемы, в которых не учитываются фактический начальный уровень напряжений в элементах и степени их включения в работу. Сложность их учета обусловлена особенностями конструктивного решения узловых соединений, величиной затяжки болтов, качеством выполнения сварных швов, наличием зазоров, неточностью изготовления и сборки, а также накопленными за время эксплуатации дефектами, деформациями и т. д.

Существующий каркас — это система, которая обладает большой степенью неопределенности в части своей пространственной работы, обусловленной большим количеством факторов, обозначенных ранее. Установка дополнительных элементов, согласно теоретическим расчетам, изменяет схему работы каркаса и не всегда может пойти на пользу,

так как фактическое включение этих элементов в работу будет иным по сравнению с теоретическими расчетами.

На основе изложенного, при выполнении реконструкции цехов повышенного уровня ответственности, представляется возможным выделить следующие проблемы современной нормативной базы:

- целесообразность проведения расчета на прогрессирующее обрушение для каждого конкретного существующего промышленного здания;
- корректность выбора аварийных сценариев, связанных с реально возможными ситуациями, в данном конкретном цехе;
- адекватность назначения нагрузок, действующих на каркас с учетом реально протекающего технологического процесса.

Цель работы — определение аварийных ситуаций в виде локальных разрушений, которые могут возникнуть в стальном каркасе промышленного здания с

учетом особенностей его эксплуатации, условий работы конструкций и действующих нагрузок.

В качестве примера рассмотрим стальной каркас одноэтажного однопролетного промышленного здания (см. рисунок). Здание оборудовано опорными мостовыми кранами грузоподъемностью 120 т, полукозловыми кранами 80 и 40 т, а также подвесными кранами 10 и 5 т.

Рядовой шаг колонн и ферм — 12 м. Верхняя часть колонн выполнена в виде сплошного сварного двутавра (стенка 900×16 мм, полки 500×20 мм). Нижняя часть двухветвевая: ветви колонн сварные двутавры (стенка 550×18 мм, полки 300×25 мм); расстояние между осями ветвей 1500 мм; ветви связаны решеткой из прокатных уголков 125×9 мм. Фермы покрытия сварные из парных уголков, решетка треугольная с промежуточными стойками.

Особенность рассматриваемого однопролетного каркаса промышленного здания — его отра-

ботанная конструкция и широкое распространение. Такие каркасы фактически являются типовыми при использовании стальных несущих конструкций. Практика производственного строительства показала, что эти каркасы при локальных повреждениях техногенного характера обладают значительной живучестью.

При выборе места локального разрушения конструкции следует использовать рекомендации нормативных документов (СП 385.1325800). Кроме того, необходимо учитывать уровень внешних силовых воздействий на конструктивные элементы в процессе эксплуатации. Анализ объемно-планировочного и конструктивного решения здания показал, что угловые колонны здания, имеющие такую же конструкцию, как и рядовые колонны, воспринимают значительно меньшие нагрузки.

Важный вопрос — выбор повреждаемого элемента при локальном разрушении колонны. Наиболее возможным и опасным является повреждение нижней части колонны на участке ее опирания на фундамент. Причиной повреждения могут быть ошибки проектирования, изготовления, эксплуатации (перегруз), технологические воздействия, удары автотранспорта и погрузчиков и т. п. Эта зона колонны наиболее напряжена при эксплуатации здания, и локальное разрушение элемента колонны на этом участке приведет к опасным последствиям.

Необходимо определить возможный характер повреждения колонны и выбрать наиболее опасный для устойчивости к прогрессирующему обрушению вариант локального повреждения. Анализ конструкции двухветвевой колонны показал, что ветви колонны — это ее основные несущие элементы и по своему вкладу в несущую способность

Продольные усилия для наружной / подкрановой ветвей колонн, кН

| Показатель | Рядовая колонна | Угловая колонна | | | |
|--|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|----------------|
| | Ряд С, ось 60/1 | Ряд С, ось 55/1 | | | |
| Собственный вес | -343,4/-186,4 | -166,8/-107,9 | | | |
| Постоянная нагрузка: | | | | | |
| | | | кровля | -107,9/-29,4 | -29,4/-9,8 |
| | | | стены | -127,5/9,8 | -49,1/19,6 |
| площадки | -29,4/-19,6 | -9,8/-9,8 | | | |
| Снеговая нагрузка | -461,1/-147,2 | -127,5/-49,1 | | | |
| Ветер-1 (поперечный на ряд С) | 892,7/-784,8 | 343,4/-343,4 | | | |
| Ветер-2 (поперечный на ряд Н) | -686,7/608,2 | -304,1/255,1 | | | |
| Ветер-3 (продольный) | -529,7/470,9 | -284,5/294,3 | | | |
| Крановая нагрузка: | | | | | |
| | | | вертикальная | -1579,4/-2226,9 | -353,2/-1177,2 |
| поперечная | ±569*/±500,3* | ±412*/±392,4* | | | |
| Максимальное сжатие (расчетное сжимающее усилие) | -3482,6/-3286,4 | -1500,9/-1775,6 | | | |
| Комбинации загрузений: | | | | | |
| | | | С1-1 | -3482,6/-1618,7 | -765,2/-19,6 |
| | | | С2-1 | -794,6/-3286,4 | 421,8/-1128,2 |
| | | | С3-1 | -2727,2/382,6 | -1500,9/480,7 |
| С4-1 | -686,7/-3070,5 | 176,6/-1775,6 | | | |

* В ветвях колонн одновременно возникают усилия разного знака.

каркаса они играют такую же роль, что и пояса ферм покрытия. Фактически двухветвевые стальные колонны представляют собой вертикальные фермы с параллельными поясами высотой сечения в данном случае 1,5 м.

Пояса этих вертикальных ферм, т. е. ветви колонн, объединены треугольной решеткой из прокатных уголков и выполнены в отличие от ферм покрытия из массивных сварных двутавров. Именно повреждение любой ветви стальной колонны на любом ее участке (также как и разрушение любого стержня пояса фермы) приводит колонну в неработоспособное состояние. Она становится неспособной воспринимать действующие проектные нагрузки и выключается из работы несущего каркаса. Таким обра-

зом, повреждение только одной из ветвей стальной двухветвевой колонны обеспечивает выполнение требования СП 385.1325800 по исключению из расчетной схемы одной из колонн.

Следует учесть, что ветви таких колонн работают на сжатие. Локальное разрушение сжатой ветви колонны из массивного стального двутавра возможно только в виде потери устойчивости в плоскости или из плоскости поперечной рамы. Особенность двухветвевых колонн — одновременное достижение в ветвях расчетных максимальных сжимающих усилий, т. е. когда в одной ветви действует максимальная сила, а в другой — меньше максимальной для этой ветви и наоборот.

В таблице приведены усилия в ветвях колонн, полученные при

расчете на основные сочетания нагрузок при нормальной эксплуатации здания.

Данные, представленные в *таблице*, подтверждают, что в ветвях угловых колонн действуют значительно меньшие (от 1,85 до 2,32 раза) усилия по сравнению с рядовыми колоннами. Максимальные усилия в ветвях колонн всегда возникают в разных сочетаниях нагрузок. Причем максимальное усилие в одной ветви достигается при сочетании нагрузок, вызывающих усилие в другой ветви в 2–4 раза меньше максимального.

Таким образом, локальное разрушение стальных двухветвевых колонн возможно в виде потери несущей способности только одной из ветвей. Разрушение одной ветви не сопровождается одновременным разрушением второй. Однако локальное разрушение любой ветви следует рассматривать как локальное разрушение всей колонны. Кроме того, возможна потеря устойчивости в плоскости поперечной рамы нижней двухветвевой части колонн как сквозного стержня (п. 7.2.2 СП 16.13330.2017 «СНиП II-23-81* Стальные конструкции»). Такое повреждение каркаса означает выход из строя не отдельного элемента, а группы элементов. Эта расширенная трактовка локального повреждения каркаса противоречит основополагающему принципу анализа устойчивости к прогрессирующему обрушению, который предполагает рассмотрение ситуации, связанной с удалением только одного несущего конструктивного элемента конструкции (п. 3.7 СП 385.1325800).

В ы в о д ы

1. Несущий каркас одноэтажного промышленного здания представляет собой отработанную, многократно проверенную на практике типовую рамно-связевую систему, состоящую из стальных сквозных колонн, стропильных и подстропильных (при необходимости) ферм, подкрановых балок, вертикальных и горизонтальных связей.

2. Место и степень локального повреждения конструктивного элемента должны определяться с учетом объемно-планировочного и конструктивного решения здания, особенностей его эксплуатации, а также напряженно-деформированного состояния.

3. Наиболее опасным участком сквозной колонны является ее самая напряженная нижняя двухветвевая часть в зоне крепления к фундаменту.

4. Максимальные усилия в ветвях стальной сквозной колонны всегда достигаются в разных сочетаниях нагрузок, что исключает одновременный выход ветвей из строя при действии нагрузок больше проектных. В качестве возможной схемы локального разрушения колонны следует рассмотреть разрушение одной ветви на участке между узлами решетки в месте крепления колонны к фундаменту.

5. Двухветвевые стальные колонны — это вертикальные фермы высотой сечения до 2–3 м, с параллельными поясами из массивных сварных двутавров и треугольной решеткой из прокатных уголков. Фактически в двухветвевой колонне каждая из ветвей может рассматриваться как отдель-

ная колонна. Решетка, объединяющая ветви-колонны, представляет собой вертикальную связь между этими двумя колоннами.

6. Повреждение любой ветви стальной колонны на любом ее участке существенно снижает несущую способность колонны, изменяет конструктивную систему каркаса и его расчетную схему и означает, что колонна в целом, при сохранении определенной несущей способности, исключается из нормальной работы каркаса.

7. Повреждение отдельного элемента одной ветви может не привести к разрушению всей колонны, если обеспечена прочность и устойчивость неповрежденной ветви и решетки. С учетом перераспределения усилий при достаточной несущей способности неповрежденная ветвь и решетка могут обеспечить работоспособность каркаса в целом при повреждении отдельной ветви. Это обуславливает высокую живучесть двухветвевой колонны как составного стержня сквозного сечения.

8. Составные сквозные двухветвевые стальные колонны по сравнению с колоннами сплошного сечения обеспечивают защиту от прогрессирующего обрушения при условии сохранения несущей способности неповрежденной ветви и решетки.

9. Для составных сквозных двухветвевых стальных колонн, выбирая схему начального локального разрушения, следует рассматривать повреждение одной из ветвей на участке между узлами решетки, что обеспечивает выполнение требований СП 385.1325800.

Л И Т Е Р А Т У Р А / R E F E R E N C E S

1. Pavlov S., Tushina O. Progressive collapse evaluation in industrial building of existing production [Оценка устойчивости к прогрессирующему обрушению каркаса промышленного здания действующего производства]. *E3S Web of Conferences*, 2019, no. 97, pp. 04053. DOI: 10.1051/e3sconf/20199704053.
2. Wang H., Zhang A., Li Y., Yan W. A review on progressive collapse of building structures [Обзор прогрессирующего обрушения строительных конструкций]. *The Open Civil Engineering Journal*, 2014, vol. 8, pp. 183–192.
3. Nethercot D. A. Design of building structures to

- improve their resistance to progressive collapse [Проектирование строительных конструкций с целью повышения их устойчивости к прогрессирующему обрушению]. *The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction. Proc. Engineering*, 2011, no. 14, pp. 1–13.
4. Marchand K. A., Stevens D. J. Progressive collapse criteria and design approaches improvement [Улучшение подходов к проектированию и критерии прогрессирующего обрушения]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2015, no. 29(5), B4015004.
 5. Kaewkulchai G., Williamson E. B. Beam element formulation and solution procedure for dynamic progressive collapse analysis [Формулировка балочного элемента и методики решения для динамического расчета при прогрессирующем обрушении]. *Computers & Structures*, 2004, vol. 82, no. 7-8, pp. 639–651.
 6. Белостоцкий А. М. [и др.]. Расчеты зданий на устойчивость против прогрессирующего обрушения с учетом физической и геометрической нелинейности // Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы: сб. тр. М. : МГСУ, 2008. С. 183–193.
 6. Belostotskiy A. M. et al. Analysis of buildings for stability against progressive collapse, taking into account physical and geometric nonlinearities. *Teoriya i praktika rascheta zdaniy, sooruzheniy i elementov konstruktсий. Analiticheskie i chislennyye metody. Sb. trudov* [Theory and practice of calculation of buildings, structures and structural elements. Analytical and numerical methods]. Moscow, MGSU Publ., 2008, pp. 183–193. (In Russian).
 7. Кудишин Ю. И., Дробот Д. Ю. К вопросу о живучести строительных конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. 2008. № 2(217). С. 36–43.
 7. Kudishin Yu. I., Drobot D. Yu. On the issue of survivability of building structures. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*, 2008, no. 2 (217), pp. 36–43. (In Russian).
 8. Кудишин Ю. И. Концептуальные проблемы живучести строительных конструкций // Вестник МГСУ. 2009. № 2. С. 28–36.
 8. Kudishin Yu. I. Conceptual problems of survivability of building structures. *Vestnik MGSU*, 2009, no. 2, pp. 28–36. (In Russian).
 9. Song B. I., Sezen H. Experimental and analytical progressive collapse assessment of a steel frame building [Экспериментально-аналитическая оценка устойчивости к прогрессирующему обрушению стального каркаса]. *Engineering Structures*, 2013, vol. 56, pp. 664–672.
 10. Song B. I., Giriunas K. A., Sezen H. Progressive collapse testing and analysis of a steel frame building [Испытания на прогрессирующее обрушение и анализ здания со стальным каркасом]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, vol. 94, pp. 76–83.
 11. Туснин А. Р., Бергер М. П. Расчет фермы с поврежденными элементами // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 11. С. 35–41.
 11. Tusnin A. R., Berger M. P. Analysis of the truss with damaged elements. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2018, no. 11, pp. 35–41. (In Russian).
 12. Berger M., Tusnin A. Experimental justification of the dynamic coefficient [Экспериментальное обоснование динамического коэффициента]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 365, iss. 5, pp. 052020. DOI: 10.1088/1757-899X/365/5/052020
 13. Tusnin A. Dynamic factors in case of damaging continuous beam supports [Коэффициенты динамичности при повреждении опор неразрезных балок]. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, no. 78(2), pp. 47–64. DOI: 10.18720/MCE.78.4.
 14. Данилов А. И. Концепция управления процессом разрушения строительного объекта // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 8. С. 74–77.
 14. Danilov A. I. Concept of control over destruction process of a building object. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2014, no. 8, pp. 74–77. (In Russian).
 15. Еремеев П. Г. Предотвращение лавинообразного (прогрессирующего) обрушения несущих конструкций уникальных большепролетных сооружений при аварийных воздействиях // Строительная механика и расчет сооружений. 2006. № 2. С. 65–72.
 15. Eremeev P. G. Prevention of avalanche (progressive) collapse of load-bearing structures of unique large-span structures during emergency impacts. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*, 2006, no. 2, pp. 65–72. (In Russian).

Для цитирования: Туснина О. А. Выбор аварийных ситуаций при расчете на прогрессирующее обрушение промышленного здания // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 9. С. 60–65. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.60-65.

For citation: Tushina O. A. The Choice of Emergency Situations when Calculating the Progressive Collapse of an Industrial Building. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2021, no. 9, pp. 60–65. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.60-65. ■

Нелокальные модели демпфирования в динамических расчетах конструкций из композитных материалов

Владимир Николаевич СИДОРОВ^{1,2}, доктор технических наук, e-mail: sidorov.vladimir@gmail.com

Елена Сергеевна БАДЬИНА^{1,2,3}, кандидат технических наук, e-mail: shepitko-es@mail.ru

¹ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

² ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», 127994 Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

³ Институт прикладной механики Российской академии наук, 125040 Москва, Ленинградский просп., 7

Аннотация. Статья посвящена исследованию и разработке нелокальных математических моделей демпфирующих свойств строительных конструкций, изготавливаемых из структурно сложных материалов (композитные и наноматериалы), для применения их в расчетах на действие динамических нагрузок. Классические модели демпфирования вполне удовлетворительно моделируют диссипативные свойства конструкций из традиционных строительных материалов (бетон, сталь). Однако результаты экспериментальных проверок показывают их существенное расхождение с результатами динамических расчетов конструкций из структурно сложных материалов. Один из прогрессивных современных подходов к адекватному моделированию диссипативных проявлений строительных конструкций из структурно сложных материалов при их сопротивлении динамическим воздействиям – аппарат дробного дифференцирования. Представлен альтернативный подход, основанный на положениях нелокальной механики. Разработанные нелокальные модели являются управляемыми, их калибровка осуществляется по результатам эксперимента с применением метода наименьших квадратов. При этом рассматриваются как аналитические модели, так и численные, органично включенные в алгоритмы расчета строительных конструкций, испытывающих нестационарные динамические воздействия, методом конечных элементов. Построение нелокальных моделей, а также обоснование их работоспособности и точности показаны на примерах динамических расчетов балок из термореактивного стеклопластика.

Ключевые слова: конструкции из композитных материалов, численное моделирование, демпфирование, нелокальная модель, метод конечных элементов.

NON-LOCAL DAMPING MODELS IN DYNAMIC CALCULATIONS OF STRUCTURES MADE OF COMPOSITE MATERIALS

Vladimir N. SIDOROV^{1,2}, e-mail: sidorov.vladimir@gmail.com

Elena S. BADINA^{1,2,3}, e-mail: shepitko-es@mail.ru

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

² Russian University of Transport, ul. Obrazcova, 9, str. 9, Moscow 127994, Russian Federation

³ Institute of Applied Mechanics of Russian Academy of Sciences, Leningradsky prospekt, 7, Moscow 125040, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the study and development of non-local mathematical models of damping properties of the building structures made of structurally complex materials (composite and nano-materials) for use in their calculations for the action of dynamic loads. The classical damping models quite satisfactorily simulate the dissipative properties of structures made from traditional building materials (concrete, steel). However, the results of experimental tests show their significant discrepancy with the results of dynamic calculations of structures made of such structurally complex materials. One of the progressive modern approaches to adequate modeling of dissipative manifestations of building structures made of structurally complex materials at their resistance to dynamic influences is the use of a fractional differentiation apparatus. An alternative approach based on the provisions of non-local mechanics is presented. The developed non-local models are controllable, their calibration is carried out according to the results of the experiment using the least squares method. At the same time, both analytical and numerical models, organically included in the algorithms for calculating building structures experiencing non-stationary dynamic effects by the finite element method, are considered. The construction of non-local models, as well as the justification of their operability and accuracy, are shown by examples of dynamic calculations of beams made of thermosetting fiberglass.

Key words: structures made of composite materials, numerical modeling, damping, non-local model, finite element method.

Введение

С появлением новых структурно сложных материалов, таких как композитные и наноматериалы, стали актуальными исследования совершенных концептуальных моделей, а также гибких и управляемых математических моделей, применяемых в расчетах конструкций из таких материалов, подвергаемых при эксплуатации динамическим воздействиям. При этом использован значительный опыт в моделировании вязкоупругих свойств материалов, отраженный в работах [1, 2].

Одним из прогрессивных современных подходов к адекватному моделированию диссипативных проявлений строительных конструкций из структурно сложных материалов при их сопротивлении динамическим воздействиям является использование аппарата дробного дифференцирования [3–5]. Другой способ повышения гибкости математических моделей внутреннего демпфирования композитных материалов основан на принципах нелокальной механики [6].

Цель настоящей работы — построение моделей нелокального демпфирования, применимых для динамических расчетов конструкций из композитных материалов.

Рассматриваемые в статье нелокальные модели демпфирующих свойств конструкций делятся на две группы — по пространственным координатам и во времени. Первая группа моделей реализует следующее предположение: гашение колебаний в некоторой точке конструкции происходит за счет изменения деформаций материала не только в этой точке, а также и в соседних точках. При этом чем дальше расположены соседние точки от рассматриваемой, тем меньше их участие в гашении ее колебаний.

Концепция, лежащая в основе второй группы моделей, исходит из предположения, что гашение колебаний конструкции в некоторый момент времени определяет скорость изменения ее деформаций не только в этот момент, но и в течение предыдущего временного отрезка.

Построение нелокальных моделей демпфирования

Рассмотрим построение нелокальных моделей демпфирования на примерах анализа затухающих колебаний балки. В основу модели, нелокальной по пространственной ординате x , взята классическая аналитическая модель вязко-упругого материала Кельвина–Фойгта, являющаяся обобщением закона Гука и связывающая нормальное напряжение σ как с линейной осевой деформацией ε , так и со скоростью ее изменения $\dot{\varepsilon}$ (верхняя точка в символах означает взятие производной по временному аргументу t):

$$\sigma = E\varepsilon(x, t) + \gamma E\dot{\varepsilon}(x, t), \quad (1)$$

где E — модуль упругости материала; γ — коэффициент демпфирования материала.

Нелокальность демпфирования по пространственной ординате x представляется заменой второго слагаемого в правой части выражения (1) слагаемым с участием интеграла по длине балки [6]:

$$\sigma(x, t) = E \left[\varepsilon(x, t) + \gamma \int_0^l C_v(|x - \theta|) \dot{\varepsilon}(\theta, t) d\theta \right], \quad (2)$$

где $C_v(|x - \theta|)$ — ядро интегрального оператора, характеризующего нелокальность демпфирования материала; x — ордината рассматриваемой точки; θ — ордината соседней точки, участвующей в гашении колебаний в точке с ординатой x .

Вид ядра $C_v(|x - \theta|)$ должен удовлетворять условиям нормирования, а именно:

$$\int_{-\infty}^{\infty} C_v(|x - \theta|) d\theta = 1. \quad (3)$$

Убывание влияния в гашении колебаний рассматриваемой точки на соседние описывается функцией ошибок, соблюдающей условие (3):

$$C_v(|x - \theta|) = \frac{\mu}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\mu^2(x-\theta)^2}{2}}. \quad (4)$$

В данном случае параметр μ характеризует степень нелокальности демпфирования материала. С увеличением значения этого параметра нелокальная модель демпфирования (2) стремится к классической локальной модели демпфирования (1).

Расчет балки под действием динамической нагрузки q , изменяющейся во времени t , с учетом нелокальности демпфирования по пространственной ординате x будем вести решением уравнения движения изгибаемого бруса:

$$\frac{\partial^2 M(x, t)}{\partial x^2} = m \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} - q(x, t), \quad (5)$$

где $M(x, t)$ — изгибающий момент; $w(x, t)$ — искомый прогиб бруса в сечении x ; m — погонная масса бруса; $q(x, t)$ — интенсивность погонной поперечной динамической нагрузки.

Изгибающий момент $M(x, t)$ представим с учетом нелокальности демпфирования материала по длине балки:

$$M(x, t) = -EI \left[\frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} + \gamma \int_0^l C_v(|x - \theta|) \frac{\partial^3 w(\theta, t)}{\partial \theta^2 \partial t} d\theta \right], \quad (6)$$

где I — момент инерции поперечного сечения балки.

Подставим выражение (6) в левую часть уравнения (5). Получим уравнение равновесия в движении



колеблющегося бруса, записанное в прогибах $w(x, t)$:

$$\frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} + \frac{EI}{m} \left[\frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + \gamma \frac{\partial^2}{\partial x^2} \int_0^l C_v(|x - \theta|) \frac{\partial^3 w(\theta, t)}{\partial \theta^2 \partial t} d\theta \right] = \frac{q(x, t)}{m}. \quad (7)$$

Задача расчета балки, колеблющейся под действием динамической нагрузки q , формулируется уравнением (7) с учетом граничных и начальных условий. К решению этой задачи применим метод Бубнова–Галеркина. При этом в качестве базисных функций $V_i(x)$ используем формы собственных колебаний упругой балки, удовлетворяющие задаваемым граничным условиям:

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^n f_i(t) V_i(x), \quad (8)$$

где $f_i(t)$ – обобщенные перемещения.

Рассмотрим пример колебаний балки длиной l , жестко защемленной по краям. В таком случае формы собственных колебаний, а значит и используемые в выражении (8) базисные функции, будут иметь вид:

$$V_i(x) = (\operatorname{sh} k_i l - \sin k_i l)(\operatorname{ch} k_i x - \cos k_i x) - (\operatorname{ch} k_i l - \cos k_i l)(\operatorname{sh} k_i x - \sin k_i x), \quad (9)$$

где k_i – i -й корень характеристического уравнения $\operatorname{ch}(kl) \cos(kl) = 1$.

Таким образом, решение задачи о колебаниях балки с участием экспоненциального ядра оператора внутреннего демпфирования (4) сводится к решению системы уравнений:

$$\ddot{f}_j(\tau) + \frac{k_j^4}{k_1^4} f_j(\tau) + \frac{\gamma \mu l \omega_1}{2 a_j k_1^4} \sum_{i=1}^n \int_0^1 V_j^{II}(z) \times \int_0^1 e^{-\mu|z-y|} V_j^{II}(y) dy dz \dot{f}_i(\tau) = \frac{q(\tau) l^4}{a_j k_1^4 EI} \int_0^1 V_j(z) dz, \quad (10)$$

где ω_i – собственные частоты; $a_j = \int_0^1 V_j^2(z) dz$; z и y – безразмерные координаты: $z = x/l$, $y = \theta/l$; τ – безразмерное время,

$\tau = t\omega_1$, $\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1^4 EI}{ml^4}}$ – первая собственная частота колебаний балки.

Вычисление обобщенных перемещений $f_i(t)$ выполнялось решением системы уравнений (10) методом Рунге–Кутты. Решение системы (10) и изменяющихся во времени прогибов колеблющейся балки было реализовано в программном комплексе, построенном в среде MATLAB [6].

Модель демпфирования, нелокальная во време-

ни, или модель «демпфирования с памятью», эффективно показывает себя при численных расчетах конструкций, выполненных из структурно сложных материалов, испытывающих динамические нагрузки. И здесь построение такой модели представлено в терминах численного метода, доминирующего в настоящее время в прикладных инженерных расчетах, – метода конечных элементов (МКЭ). В алгоритме МКЭ уравнение равновесия конструкции, деформируемой в движении, представляется в матричном виде и записывается в перемещениях [7]:

$$M \ddot{\bar{V}}(t) + D \dot{\bar{V}}(t) + K \bar{V}(t) = \bar{F}(t). \quad (11)$$

где M – матрица масс расчетной модели; D – расчетная модель; K – матрица жесткости конечно-элементной расчетной модели; $\bar{V}(t)$ – искомый вектор перемещений; $\bar{F}(t)$ – вектор внешних силовых воздействий.

Матрица демпфирования расчетной модели D строится из условий стационарности выражения изменения полной энергии деформируемой системы, включающей функцию рассеяния энергии за счет внутреннего трения в материале $1/2 d\epsilon^2$.

Чтобы построить модель демпфирования с памятью, представим уравнение (11) в виде:

$$M \ddot{\bar{V}}(t) + \int_0^t G(t - \tau) \dot{\bar{V}}(\tau) d\tau + K \bar{V}(t) = \bar{F}(t), \quad (12)$$

где $G(t - \tau)$ – ядро оператора демпфирования.

Данная функция описывает убывание влияния скорости изменения деформаций в предшествующие моменты времени τ на демпфирование в текущий момент t , при этом

$$\int_0^t G(t - \tau) d\tau = 1. \quad (13)$$

В качестве ядра оператора демпфирования, как и в нелокальной модели по пространственной координате, используем функцию ошибок, которая при выполнении условия (13) принимает вид:

$$G(t - \tau) = \frac{2\mu}{\sqrt{\pi}} e^{-\mu^2(t-\tau)^2}, \quad (14)$$

где μ – параметр, характеризующий масштаб нелокальности демпфирования материала во времени.

Для численного решения уравнения динамического равновесия используем метод центральных разностей [8]. При преобразовании уравнения (12) в вычислительную схему с использованием метода центральных разностей уравнение движения принимает вид [7]:

$$\frac{1}{\Delta t^2} M (\bar{V}_{i+1} - 2\bar{V}_i + \bar{V}_{i-1}) + \frac{D}{2} \bar{Z} + \frac{1}{2\Delta t} D (\bar{V}_{i+1} - \bar{V}_i) + K \bar{V}(t) = \bar{F}_i, \quad (15)$$

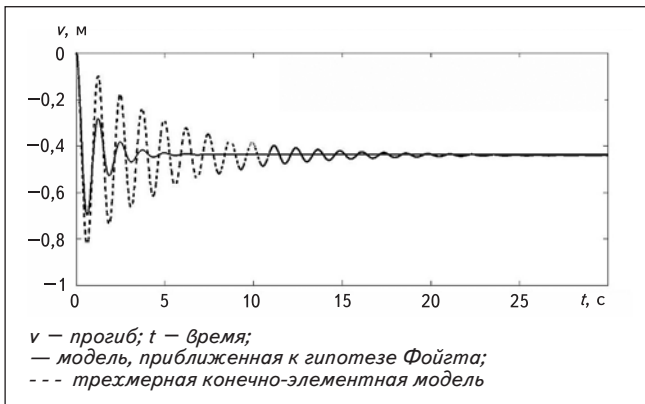


Рис. 1. Результаты численного эксперимента в сравнении с результатами расчета с использованием локальной одномерной модели, построенной на основе гипотезы Фойгта

$$\text{где } \bar{Z} = \sum_{j=1}^i \frac{2\mu}{\sqrt{\pi}} e^{-\mu^2 \left(t - \left(\tau - \frac{\Delta t}{2}\right)\right)^2} (\bar{V}_j - \bar{V}_{j-1}). \quad (16)$$

Здесь i – порядковый номер рассматриваемого временного шага; j – номера предыдущих временных шагов.

Схема для последовательного пошагового вычисления \bar{V}_{i+1} через векторы \bar{V}_i и \bar{V}_{i-1} , которые определяются на предыдущих шагах, строится на основе (15):

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{2\Delta t} D \right) \bar{V}_{i+1} + \left(-\frac{2}{\Delta t^2} M - \frac{1}{2\Delta t} D + K \right) \bar{V}_i + \frac{1}{\Delta t^2} M \bar{V}_{i-1} + \frac{D}{2} \bar{Z} = \bar{F}_i. \quad (17)$$

Обозначим в выражении (17):

$$\begin{aligned} Q &= \left(\frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{2\Delta t} D \right)^{-1}, \\ Q_1 &= Q \left(-\frac{2}{\Delta t^2} M - \frac{1}{2\Delta t} D + K \right), \\ Q_2 &= \frac{1}{\Delta t^2} Q M, \quad Q_3 = \frac{1}{2} Q D. \end{aligned} \quad (18)$$

Тогда схема пошагового решения во времени дискретного уравнения движения (12) с использованием принятой модели демпфирования материала, обладающего памятью, приобретает вид:

$$\bar{V}_{i+1} = Q \bar{F}_i - Q_1 \bar{V}_i - Q_2 \bar{V}_{i-1} - Q_3 \bar{Z}. \quad (19)$$

На первом шаге при $i = 1$ в качестве начальных условий принято $\bar{V}_0 = 0$ и $\bar{V}_1 = 0$.

Примеры использования нелокальных моделей в расчетах

В качестве примеров применения нелокальных моделей демпфирования рассмотрен расчет изгибаемого бруса длиной 6 м прямоугольного поперечного сечения из терморезистивного винилэфирно-

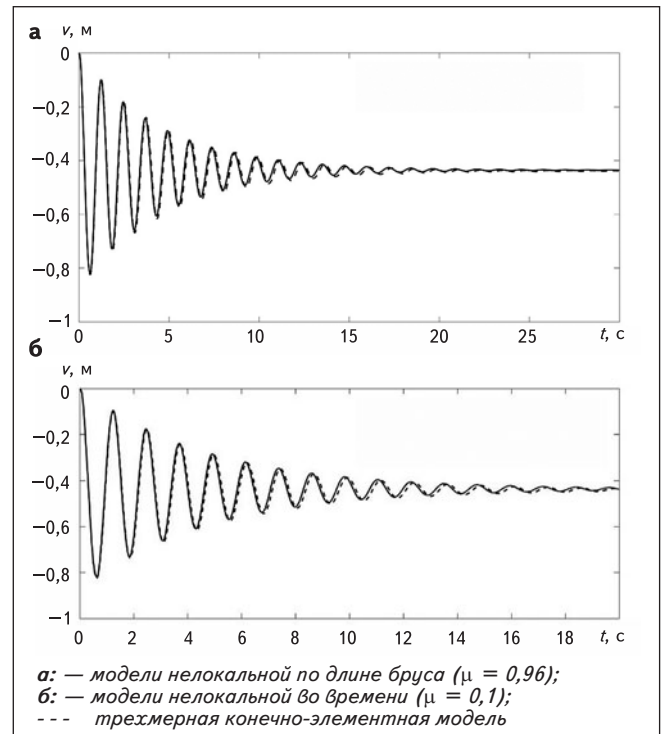


Рис. 2. Результаты численного эксперимента в сравнении с результатами расчета с использованием откалиброванных нелокальных моделей

го стеклопластика. Брус защемлен по концам, его колебания вызваны мгновенно приложенной равномерно распределенной нагрузкой интенсивностью $q = 10$ кН/м. Результаты использования нелокальных моделей сравнивались с результатами численного эксперимента с подробной трехмерной конечно-элементной моделью бруса, выполненной в верифицированном расчетном комплексе SIMULIA Abaqus CAE. В этом эксперименте рассматриваемый композитный материал, имеющий различную жесткость и коэффициенты Пуассона во взаимортогональных направлениях, представлялся как ортотропный.

На рис. 1 представлен график перемещений среднего сечения бруса, полученный в результате численного эксперимента, в сравнении с графиком, построенным с использованием локальной одномерной модели на основе классической гипотезы Фойгта. Кроме того, приведено сравнение результатов численного эксперимента и результатов расчета колебаний бруса из композитного материала с применением моделей демпфирования: нелокальной по длине бруса (рис. 2а) и нелокальной во времени (рис. 2б), калибруемых с использованием метода наименьших квадратов [9].

Таким образом, в отличие от моделей, построенных на основе гипотезы Фойгта, калибруемые с использованием метода наименьших квадратов, одно-

мерные модели нелокального демпфирования позволяют получить результаты динамического расчета конструкций из современных композитных материалов, хорошо совпадающие с данными численного эксперимента, выполненного с учетом характерных ортотропных свойств композитного материала.

Вывод

Рассмотренные нелокальные модели внутренней демпфирования могут быть использованы при динамических расчетах элементов строительных конструкций, выполненных из композитных и других структурно сложных материалов. В сравнении с классической локальной моделью Кельвина–Фойгта они позволяют добиться хорошего совпадения с результатами численного эксперимента. Так, при

работе с конструкциями из материалов с развитой внутренней структурой применение этих моделей позволяет использовать одномерные расчетные схемы вместо подробных трехмерных, что может быть весьма актуально при решении задач оптимизации. Модель демпфирования, нелокальная во времени, может быть встроена в алгоритм метода конечных элементов, что делает ее применимой при численном решении прикладных задач.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект «Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз», номер проекта № FSWG-2020-0007).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Работнов Ю. Н. Элементы наследственной механики твердого тела. М. : Наука, 1977. 384 с.
1. Rabotnov Yu.N. *Elementy nasledstvennoj mekhaniki tvjrdogo tela* [Elements of hereditary mechanics of solids]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 384 p. (In Russian).
2. Потапов В. Д. Устойчивость стержней при стохастическом нагружении с учетом нелокального демпфирования // Проблемы машиностроения и теории надежности. 2012. № 4. С. 25–31.
2. Potapov V. D. On the stability of a rod under the deterministic and stochastic load taking into account the nonlocal elasticity and nonlocal damping of the material. *Problemy mashinostroeniya i teorii nadezhnosti*, 2012, no. 4, pp. 25–31. (In Russian).
3. Rossikhin Yu. A., Shitikova M. V. Application of fractional calculus for dynamic problems of solid mechanics [Применение дробного исчисления в динамических задачах механики деформируемого твердого тела]. *Novel Trends and Recent Results Applied Mechanics Reviews*, 2010, vol. 63, pp. 010801: 1–52.
4. Di Paola M., Failla G., Pirrotta A., Sofi A., Zingales M. The mechanically based non-local elasticity: an overview of main results and future challenges [Нелокальная упругость в механике: обзор основных результатов и будущих задач]. *Phil Trans R Soc A*, 2013, 371:20120433. DOI: 10.1098/rsta.2012.0433.
5. Rahimi Z., Rezazadeh G., Sumelka W. A non-local fractional stress–strain gradient theory [Дробное исчисление в нелокальной градиентной теории упругости]. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2020, no. 16(2), pp. 265–278. DOI: 10.1007/s10999-019-09469-7.
6. Fyodorov V. S., Sidorov V. N., Shepitko E. S. Nonlocal damping consideration for the computer modelling of linear and nonlinear systems vibrations under the stochastic loads [Учет нелокального демпфирования при компьютерном моделировании колебаний линейных и нелинейных систем под действием стохастических нагрузок]. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 456, pp. 012040. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012040.
7. Сидоров В. Н., Бадина Е. С. Метод конечных элементов в задачах устойчивости и колебаний стержневых конструкций. М. : ACB, 2021. 172 с.
7. Sidorov V. N., Badina E.S. *Metod konechnykh elementov v zadachach ustojchivosti i kolebanij stержnevych konstrukcij* [The finite element method in problems of stability and vibrations of rod structures]. Moscow, ASV Publ., 2021. 172 p. (In Russian).
8. Бате К. Ю., Вилсон Э. Л. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М. : Стройиздат, 1982. 448 с.
8. Bathe K. J., Wilson E. L. *Chislennyye metody analiza i metod konechnykh elementov* [Numerical methods in finite element analysis]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982. 448 p. (In Russian).
9. Shepitko E. S., Sidorov V. N. Defining of nonlocal damping model parameters based on composite beam dynamic behavior numerical simulation results [Определение параметров модели нелокального демпфирования на основе результатов численного моделирования динамического поведения композитной балки]. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 675, pp. 012056.

Для цитирования: Сидоров В. Н., Бадина Е. С. Нелокальные модели демпфирования в динамических расчетах конструкций из композитных материалов // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 9. С. 66–70. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.66-70.

For citation: Sidorov V. N., Badina E. S. Non-Local Damping Models in Dynamic Calculations of Structures Made of Composite Materials. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2021, no. 9, pp. 66–70. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.66-70. ■

Легкая градирня для тепловой электростанции

Мухамед Нургалиевич КОКОЕВ, доктор технических наук, профессор, советник РААСН, генеральный директор, e-mail: kbagrostroy@yandex.ru

АО «Каббалкагропромстрой», 360001 г. Нальчик, просп. Кулиева, 10

Виктор Тихонович ФЕДОРОВ, доктор технических наук, советник, e-mail: fedorovsteer@gmail.com

ЗАО «Концерн «Наноиндустрия», 119334 Москва, ул. Бардина, 4, корп. 1

Аннотация. Летние потери воды на испарение и унос ветром в испарительных градирнях с тепловой мощностью 2000 МВт равны потреблению воды города с населением 200 тыс. человек. Высокая влажность и отрицательная температура способствуют образованию гололеда в радиусе одного–двух километров от электростанций. Уже давно появились на электростанциях так называемые сухие градирни, у которых отсутствуют недостатки испарительных градирен. Однако «сухие» градирни имеют главный недостаток – высокую стоимость. Отмечается, что градирни часто строятся с башнями из монолитного или сборного железобетона. Это трудоемко, требует много времени и дорого. Для снижения стоимости строительства «сухих» градирен предложено строить сейсмостойкие сборные башни из пневматических конусных балок. Пневматические балки сварены из прочной комбинированной технической ткани с климатостойким покрытием. Как показывают расчеты, для больших диаметров пневматических балок при требуемом давлении воздуха прочности ткани недостаточно. Для усиления балок должны применяться сетки из прочных шнуров или канатов с климатостойким покрытием. Сделан расчет башни градирни для тепловой электростанции высотой 100 м.

Ключевые слова: тепловая электростанция, испарительная и «сухая» градирни, сборные башни из пневматических балок, сейсмостойкость, технические ткани с климатостойким покрытием.

LIGHT WEIGHT COOLING TOWER FOR THERMAL POWER PLANT

Muhamed N. KOKOEV, e-mail: kbagrostroy@yandex.ru

Kabbalkagropromstroy, ul. Kulieva, 10, Nalchik 360030, Russian Federation

Victor T. FEDOROV, e-mail: fedorovsteer@gmail.com

Concern "Nanoindustry", ul. Bardina, 4, korp. 1, Moscow 119334, Russian Federation

Abstract. Summer water losses due to evaporation and wind carry-over in evaporative cooling towers with a thermal capacity of 2000 MW are equal to the water consumption of a city with a population of 200 thousand people. High humidity and freezing temperatures contribute to the formation of ice within a radius of 1-2 kilometers from power plants. The so-called "dry" cooling towers have long appeared at power plants. They do not have the disadvantages of evaporative cooling towers. The main disadvantage of "dry" cooling towers is their high cost. It is noted that "wet" and "dry" cooling towers are often built with towers of precast or monolithic reinforced concrete. It is labor intensive, time consuming and expensive. To reduce the cost of construction of "dry" cooling towers, it is proposed to build earthquake-resistant lightweight prefabricated towers from pneumatic cone beams. The pneumatic beams are welded from a strong combined technical fabric with a climate-resistant coating. Calculations show that for large diameters of pneumatic beams at the required air pressures, the strength of the fabric is insufficient. To strengthen the beams, meshes made of strong cords or ropes with a climate-resistant coating, should be used. The calculation of the tower of the cooling tower with a height of 100 m for a thermal power plant is made.

Key words: thermal power plant, evaporation and "dry" cooling towers, prefabricated towers made of pneumatic beams, earthquake resistant, technical fabrics with a climate-resistant coating.

На тепловых и атомных электростанциях в испарительных и «сухих» градирнях охлаждается оборотная вода, которая, в свою очередь, забирает тепло конденсации пара, отработавшего в турбинах. Чем ниже температура оборотной воды, тем ниже давление пара в конденсаторах, тем больше пар имеет возможности расширяться и отдавать свою энергию на последних

ступенях паровой турбины, следовательно, тем больший достигается коэффициент полезного действия (КПД) тепловой электростанции (ТЭС).

Повышение КПД тепловой электростанции мощностью 2000 МВт только на 1 % экономит около 5400 т топливного мазута в год. Кроме прямой экономии на топливе, меньший ущерб наносится природной среде, по-

скольку на единицу выработанной энергии приходится меньше вредных выбросов.

Большинство тепловых электростанций в России пока потребляют не газ, а каменный и бурый уголь и мазут. Это топливо содержит от 0,3 до 3,5 % серы. При сжигании серосодержащего топлива образуются оксиды серы: сернистый ангидрид (SO₂) и серный ангидрид (SO₃). При вза-

имодействии SO_2 и SO_3 с парами воды в воздухе образуются соответственно сернистая и серная кислоты. Около 60 % всех содержащихся в дождевой воде кислот составляет серная кислота [1].

На отечественных ТЭС нет промышленных сероулавливающих установок. Такие установки с 1970-х гг. используются в некоторых странах Европы, Северной Америки и Японии. Эффективность очистки дымовых газов от SO_2 составляет 90–96 %. Большинство ТЭС используют в установках для очистки дымовых газов известняк. В результате получают гипс ($CaSO_4$), который поставляют строительным фирмам. Это покрывает часть расходов на эксплуатацию установок по очистке дымовых газов от серы.

Испарительные градирни эффективно охлаждают воду, однако на испарение части охлаждаемой воды расходуется много тепловой энергии [2]. Этому способствует большая поверхность охлаждения воды в виде капель или тонких пленок в системе орошения испарительных градирен. Кроме того, к испарительным («мокрым») градирням есть большие претензии со стороны служб охраны природы. Потери воды в испарительной градирне на испарение и унос ветром составляют от 1,5 до 2,5 % объема охлаждаемой воды. При нагрузке 100 тыс. $m^3/ч$ потери воды составят 48 000 m^3 в сутки при 2 % уноса, что равно потреблению воды городом с населением 200 тыс. человек. Такие потери становятся неприемлемыми из-за растущего недостатка пресной воды вследствие обмеления многочисленных рек в Европе, включая европейскую часть России, из-за потепления климата [3] и роста потребления воды энергетикой и промышленностью.

Температура оборотной воды,

поступающей в конденсаторы энергоблоков башенной испарительной градирни, зависит от силы ветра. Наклон паровоздушного факела такой градирни под действием ветра ведет к уменьшению живого сечения градирни, уменьшению расхода воздуха и, как следствие, к снижению теплового КПД электростанции [4, 5]. В осенне-зимний период, в зависимости от розы ветров и метеословий, испарительные градирни повышают относительную влажность окружающего воздуха, что способствует простудным заболеваниям, а в некоторых случаях (даже при расположении во вполне умеренном климате) — заболеванию пневмонией различной этиологии. Такие случаи наблюдались в США, ФРГ и других странах [6, 7]. Высокая влажность в сочетании с температурой ниже нуля ведет к образованию гололеда в радиусе нескольких сотен метров и даже километров от электростанций.

Тепловые электростанции, работающие на каменном и буром угле, порождают экологических проблем больше, чем другие объекты энергетики. Не все зольные частицы в дымовых газах удается уловить электрофильтрами, но если процесс идет в рамках регламента, особенно по влажности дымовых газов, то их удается уловить в количестве 99 % и выше. Но с учетом того, что, например, на ТЭС областного масштаба в сутки сжигается 8–10 эшелонов угля, одного процента неуправленной тонкой золы будет более чем достаточно для загрязнения территорий.

Для уменьшения выбросов этих частиц и вредных газов в некоторых странах в испарительную градирню выводят после электрофильтра дымовые газы электростанций [8]. Тогда испарительная градирня работает отчасти как большой скруббер. Правда, это приводит к тому, что

железобетонная башня испарительной градирни разрушается быстрее из-за агрессивного действия на влажный бетон и оголенную стальную арматуру дымовых газов, содержащих оксиды серы и азота. Особенно быстро железобетон разрушается у верхней кромки башни вследствие совместного воздействия влаги, больших колебаний температуры, льда и агрессивных газов.

Ремонт башенных градирен весьма трудоемок и дорог. Некоторые градирни имеют высоту 180 м, и ремонтники работают как промышленные альпинисты. Для увеличения межремонтных периодов внутреннюю поверхность железобетонной башни покрывают многослойной гидроизоляцией на основе битума или эпоксидных и полиэфирных смол. В районах с высокой сейсмичностью иногда строят башенные градирни в виде стального призматического, конусного или цилиндрического каркаса, облицованного алюминиевыми или композитными панелями.

Серьезные недостатки испарительных градирен, указанные выше, заставляют искать новые решения. К примеру, уже давно существуют так называемые сухие градирни. Они впервые появились на электростанциях во второй половине XX в. В последние годы их использование на электростанциях быстро растет.

«Сухие» градирни имеют различное конструктивное исполнение. Обычно радиаторная («сухая») градирня представляет собой корпус с размещенными внутри теплообменниками, по которым циркулирует охлаждающая жидкость. Поток тепла от воды уносят вентиляторы, обдувающие трубчатые радиаторы потоком наружного воздуха.

Наиболее известно новшество венгерских инженеров Геллера–Форго, много лет работающих

над совершенствованием «сухих» градирен. Оно заключается в том, что отходящий пар турбины охлаждается в поверхностном конденсаторе, в котором пар интенсивно конденсируется при непосредственном контакте с поверхностью охлаждающей воды. Конденсированный пар возвращается в контур котла с помощью питательного насоса [9]. В свою очередь, для отвода тепла от охлаждающей воды применяется водяной контур с помощью ребристых радиаторов градирен с естественной и/или принудительной тягой. Немало существует «сухих» градирен с комбинированным охлаждением радиаторов, т. е. часть тяги создается башней, а работа вентиляторов усиливает естественную тягу.

Основной недостаток «сухих» градирен — большая материалоемкость металлических ребренных теплообменников. Причем сейчас для изготовления теплообменников используется алюминий или нержавеющая сталь, что и определяет высокую стоимость «сухих» градирен.

«Сухие» градирни позволяют отказаться от расхода воды рек и озер для сброса тепла. Их применение исключает выбросы электростанциями в атмосферу паров воды, что во многом решает и проблему «локального» парникового эффекта. На некоторых электростанциях в России уже работают обратные системы технического водоснабжения с использованием «сухих» градирен. Однако пока такие градирни применяют на сравнительно небольших электростанциях мощностью от 48 до 180 МВт.

Достоинства «сухих» градирен:

- почти нет потерь воды, что важно в районах с сухим и жарким климатом. Некоторые потери воды имеются тогда, когда применяется комбинированная система сухого и орошаемого охлаж-

дения. При этом система сухого охлаждения работает весь год, за исключением наиболее жарких летних часов, когда вода подается на перфорированные плоские пластины трубчато-пластинчатых теплообменников. Иными словами, тогда, когда «сухая» градирня в самые жаркие часы не справляется с охлаждением оборотной воды, а делать систему охлаждения только сухой ради нескольких десятков жарких часов работы в году экономически нецелесообразно;

- отсутствие прямого контакта охлаждаемой воды с атмосферным воздухом исключает ее загрязнение пылью и микроорганизмами, что повышает надежность работы системы и уменьшает интенсивность коррозионных процессов;

- отсутствуют длинный паровой факел и высокая влажность, поэтому «сухие» градирни не влияют на окружающую среду в районе расположения станции, а в холодный период исключают образование наледи на градирнях и сооружениях электростанции, гололеда на проводах ЛЭП.

Некоторые противники «сухих» градирен ссылаются на дороговизну этих сооружений. «Сухие» градирни, по некоторым оценкам, в 3,5 раза дороже «мокрых» и в 1,5 раза — комбинированных [10]. Однако этот фактор не так существен, поскольку стоимость градирен составляет лишь несколько процентов от полной стоимости электростанций.

Кроме того, «сухие» градирни гораздо дешевле в эксплуатации, у них продолжительнее межремонтный период. При их работе почти отсутствуют потери пресной воды, что дает большую экономию.

Для компенсации затрат на более дорогие, но экологичные «сухие» градирни, надо искать пути снижения стоимости строи-

тельства башенных градирен, как «сухих», так и «мокрых». Тем более, что в каких-то случаях, исходя из климатических и географических условий, испарительные градирни еще долго будут строиться.

Башня градирни — самая трудоемкая и дорогая часть градирни. Она служит для создания естественной тяги воздуха. Теплый воздух поднимается вверх, и чем выше башня, тем сильнее тяга. При плохой тяге охлаждение оборотной воды неэффективно. Нередко высокая башня сооружается над «сухой» градирней. Конструкция «сухой» градирни с башней снижает расход электроэнергии на собственные нужды электростанции.

Есть ряд работ, в которых рассматривается новый подход к строительству башенных градирен [11–13]. Так, конструкция башни, основанная на использовании новых материалов, обещает снижение материалоемкости во много раз по сравнению с железобетонной башней, а следовательно, и сокращение сроков строительства, уменьшение стоимости плюс повышение сейсмостойкости. Основой для разработки таких градирен стало появление высокопрочных технических тканей, лент и канатов с полимерными покрытиями, устойчивых к климатическим воздействиям [14].

Новые материалы открывают возможность создания легких градирен с высокой сейсмостойкостью на основе воздухонесомых пневматических конструкций. Современные возможности автоматизации снижают риски аварийных ситуаций таких сооружений. Как оказалось, для выполнения основной функции башне градирни совсем необязательно быть жесткой. Для пневматической конструкции башни допустима упругая деформация в дозволённых пределах, которая

может быть на много порядков больше, чем для железобетона.

Далее дано краткое описание варианта новой градирни среднего размера общей высотой 100 м: от нулевого уровня до отметки 20 м — силовой каркас со встроенной системой сухого охлаждения Геллера—Форго; от отметки 20 м до отметки 100 м — сборная башня с наружными диаметрами 62 м (внизу) и 28 м (вверху). Сверху башня имеет замыкающее кольцо с отверстием диаметром 22 м в свету. Для увеличения живого сечения градирни пневматические балки можно развернуть наружу, чтобы придать башне традиционную гиперболическую форму. Но такая форма менее обтекаема ветром. Профиль башни имеет форму немного выпуклого усеченного конуса. Она собрана из 36 вертикальных слегка изогнутых пневматических балок длиной 80 м. Пневматические балки имеют конусную форму. Их диаметр уменьшается от 7 м внизу до 3 м вверху на длине 80 м.

Балки нижней частью крепятся к силовому каркасу градирни. Горизонтальные ленточные бандажи с внешней стороны скрепляют (стягивают) балки и заставляют их работать под ветровой нагрузкой как одно целое. Стянутая ленточными бандажами в сборе, каждая балка в поперечном сечении принимает форму трапеции с выпуклыми двумя сторонами и скругленными углами. Все балки в таком виде работают как замковый камень в арке. Небольшие вихревые воздушные насосы, датчики давления и простая автоматика компенсируют колебания давления воздуха из-за изменения температуры, скорости ветра, а также возможные утечки из пневматических балок. Объем каждой балки — около 1500 м³. Вихревые насосы и автоматика градирни подключены к трижды резер-

вированной системе электропитания, как и другие элементы, отвечающие за живучесть электростанции.

Пневматические балки сварены из прочной комбинированной технической ткани [15], основу которой составляет стеклоткань с покрытием из поливинилхлорида или политетрафторэтилена [16, 17].

Кроме того, для создания хорошей тяги оболочка башни должна обладать номинальным тепловым сопротивлением. Это достигается применением для изготовления пневмобалок технической ткани, дублированной с внутренней стороны пенополиэтиленом или пенополиуретаном. По тепловому сопротивлению два слоя по 5 мм пенополиуратана (пневмобалка граничит с наружной атмосферой и внутренней средой башни) равны слою железобетона толщиной 250 мм.

Чтобы балки могли нести расчетную ветровую нагрузку при скорости ветра 36 м/с, в них давление воздуха должно быть 190 кПа. При большей ветровой нагрузке рабочее давление воздуха в балках должно быть выше. Как показывают расчеты, для пневматических балок больших диаметров при указанном давлении воздуха прочности ткани далеко не достаточно. Для усиления балок должны применяться сетки из прочных шнуров или канатов на основе стекловолокна с климатостойким экструзионным покрытием [18, 19]. Армировать оболочку пневматической балки высокопрочной сеткой из шнуров можно на механизированном стапеле. В случае возникновения наледи на оболочке балки ее можно разрушать периодическим изменением давления воздуха.

Технически возможны и многие другие конструкции башни на основе несущих пневматических балок. Отметим простоту их пе-

ревозки в свернутом виде, сборки из них башен градирен, а также их высокую сейсмическую устойчивость.

Пневматические балки не разрушают ни колебания температуры, ни лед, ни вода, ни агрессивные газы. Особо надо подчеркнуть высокую ремонтпригодность башен, собранных из пневматических балок, так как их замену можно выполнить за несколько дней.

Расчет вышеприведенной башни, собранной из пневматических балок, дает массу сооружения примерно 70 т без учета массы нижнего силового каркаса со встроенной системой сухого охлаждения Геллера—Форго.

Выводы

1. «Сухие» градирни электростанций дешевле в эксплуатации, чем испарительные, и у них больше межремонтный период. Кроме того, при работе таких градирен отсутствуют потери пресной воды, что дает большую экономию и не ухудшает экологию в районе расположения электростанции.

Для компенсации стоимости более дорогих «сухих» градирен надо искать пути снижения стоимости строительства башенных градирен.

2. Для выполнения основной функции башне градирни совсем необязательно быть жесткой. Для пневматической конструкции башни допустима упругая деформация, но в дозvoленных пределах.

Свойства новых материалов открывают возможность создания легких градирен с высокой сейсмостойкостью на основе воздухонесомых пневматических конструкций. Современные сенсоры и средства автоматизации снижают риски возникновения аварийных ситуаций в сооружениях с пневматическими элементами.

3. Предложенная концепция нового подхода к разработке ба- шен градирен для ТЭС и АЭС на основе воздушных пневма- тических конструкций с исполь- зованием климатостойких совре- менных материалов нуждается в проведении научно-исследова- тельских работ.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Lovelock James E. *The future: the next evolution of Gaia* [Будущее: следующая эволюция Геи]. Allen Lane. 2014. 240 p.
2. Елизаров Д. П. Теплоэнергетические установки электростанций. М. : Энергоиздат, 1982. 264 с.
2. Elizarov D. P. *Teploenergeticheskie ustanovki elektrostancij* [Thermal heating systems of power plants]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 264 p. (In Russian).
3. Данилов-Данилян В. И., Лосев К. С. Экологический вызов и устойчивое развитие. М. : Прогресс-Традиция, 2000. 414 с.
3. Danilov-Daniyan V. I., Losev K. S. *Ekologicheskij vyzov i ustojchivoje razvitie* [Environmental challenge and sustainable development]. Moscow, Progress-Tradicija Publ., 2000. 414 p. (In Russian).
4. Garmize L. H., Dashkov G. V., Soloduchin A. D., Fisenko S. P. Laboratory modeling of heat transfer enhancement in evaporative cooling towers [Лабораторное моделирование интенсификации теплоотдачи в испарительных градирнях]. *Journal of Engineering Physics*, 1994, vol. 66, pp. 143–150.
5. Петручик А. И., Солoduхин А. Д., Столович Н. Н., Фисенко С. П. К анализу экспериментальных данных о тепловой эффективности башенной испарительной градирни // Известия РАН. Серия: Энергетика. 2000. № 6. С. 142–149.
5. Petrushik A. I., Soloduhin A. D., Stolovich N. N., Fisenko S. P. On the analysis of experimental data on the thermal efficiency of a tower evaporative cooling tower. *Izvestiya RAN. Seriya Energetika*, 2000, no. 6, pp. 142–149. (In Russian).
6. Mathys W., Stanke J., Harmuth M., Junge-Mathys E. Occurrence of legionella in hot water systems of single-family residences in suburbs of two German cities with special reference to solar and district heating [Возникновение легионеллы в системах горячего водоснабжения многоквартирных домов в пригородах двух немецких городов с особым упором на солнечную энергию и централизованное отопление]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, BRD, 2008, vol. 211, no. 1-2, pp. 179–185.
7. Cunha B. A., Burillo A., Bouza E. Legionnaires' disease [Болезнь легионеров]. *Lancet*, 2016, pp. 376–385. DOI: 10.1016/S0140-6736(15)60078-2.
8. Ernst G., Leidinger B., Natusch K., Petzel H., Scholl G. Kühlturm und Rauchgas-entschwefelungs-anlage des Modelkraftwerkes Völklingen [Градирня и система десульфуризации дымовых газов модельной электростанции]. VDI-Verlag, 1986. 366 S.
9. Болдырев В. М. «Сухие» градирни на тепловых и атомных электростанциях как средство снижения антропогенных выбросов // Промышленные ведомости. 2008. № 3-4. URL: <https://www.promved.ru/articles/article.phtml?id=1412&nomer=50> (дата обращения: 17.08.2021).
9. Boldyrev V. M. "Dry" cooling towers at thermal and nuclear power plants as a means of reducing anthropogenic emissions. *Promyshlennye vedomosti*, 2008, no. 3-4. Available at: <https://www.promved.ru/articles/article.phtml?id=1412&nomer=50> (accessed 17.08.2021). (In Russian).
10. Болдырев В. М., Клейменов П. Г. Значимость «сухих» градирен для АЭС и других тепловых электростанций // Промышленные ведомости. 2015. № 3. URL: <https://www.promved.ru/articles/article.phtml?id=2843&nomer=95> (дата обращения: 17.08.2021).
10. Boldyrev V. M., Klejmenov P. G. The importance of "dry" cooling towers for nuclear power plants and other thermal power plants. *Promyshlennye vedomosti*, 2015, no. 3. Available at: <https://www.promved.ru/articles/article.phtml?id=2843&nomer=95> (accessed 17.08.2021). (In Russian).
11. Федоров В. Т., Кокоев М. Н. Градирня из технической ткани (градирня воздухоопорной конструкции для тепловой электростанции) // Энергия: техника, экономика, экология. 1998. № 6. С. 56–59.
11. Fedorov V. T., Kokoev M. N. Cooling tower made of technical fabric (air-supported cooling tower for a thermal power plant). *Energiya: tekhnika, ekonomika, ekologiya*, 1998, no. 6, pp. 56–59. (In Russian).
12. Кокоев М. Н. Технические ткани в строительстве // Строительные материалы. 1998. № 1. С. 24–26.
12. Kokoev M. N. Industrial textiles in construction. *Stroitel'nye materialy*, 1998, no. 1, pp. 24–26. (In Russian).
13. Федоров В. Т., Кокоев М. Н. Новые материалы для строительства градирен электростанций // Вестник отделения строительных наук РААСН. 2012. Вып. 16. Т. 2. С. 158–164.
13. Fedorov V. T., Kokoev M. N. New materials for the construction of cooling towers of power plants. *Vestnik otdeleniya stroitel'nyh nauk RAASN*, 2012, iss. 16, vol. 2, pp. 158–164. (In Russian).
14. Moritz K., Barthel R. Transparente architektur – bauen mit ETFE-Folien [Прозрачная архитектура – здание из пленки ETFE]. *Detail*, 2002, no. 12, pp. 1616–1620.
15. Kaiser W. Kunststoffchemie für Ingenieure [Химия пластмасс для инженеров]. 3. Auflage. München, Carl Hanser, 2011. 20 S.
16. Дыховичный Ю. А., Жуковский Э. З., Ермолов В. В. [и др.]. Современные пространственные конструкции. М. : Высшая школа, 1991. 543 с.
16. Dyhovichnyj Yu. A., Zhukovskij E. Z., Ermolov V. V. et al. *Sovremennye prostranstvennye konstrukcii*

- [Modern spatial structures]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991. 543 p. (In Russian).
17. Koltzenburg S., Maskos M., Nuyken O. Polymere: synthese, eigenschaften und anwendungen [Полимеры: синтез, свойства и применение]. 1. Auflage, Springer Spektrum, 2014. 406 S.
18. Hong Li, Richards Ch., Watson J. High-performance glass fiber development for composite applications [Разработка высокоэффективного стекловолокна для композитных приложений]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2014, no. 5 (1), pp. 65–81.
19. Greif H., Limper A., Fattmann G., Seibel S. Verfahrenstechnik der Thermoplastextrusion [Технологический процесс экструзии термопластов]. München, Carl Hanser Verlag, 2012. 403 S.

Для цитирования: Кокоев М. Н., Федоров В. Т. Легкая градирня для тепловой электростанции // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 9. С. 71–76.
DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.71-76.

For citation: Kokoev M. N., Fedorov V. T. Light Weight Cooling Tower for Thermal Power Plant. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2021, no. 9, pp. 71–76. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2021.09.71-76. ■

ПОЗДРАВЛЕНИЕ М. Н. КОКОЕВУ



Активному автору нашего журнала доктору технических наук, профессору, генеральному директору АО «Каббалкагропромстрой», вице-президенту Союза сельских строителей России, заслуженному строителю России Мухамеду Нурғалиевичу Кокоеву исполняется 70 лет.

После окончания инженерно-технического факультета Кабардино-Балкарского государственного университета (КБГУ) М. Н. Кокоев был направлен в объединение «Каббалкамежколхозстрой», преобразованное позднее в АО «Каббалкагропромстрой», где прошел трудовой путь от инженера до генерального директора акционерного общества. Возглавляемая им организация построила в республике более 6 тыс. объектов социального назначения: жилых домов, школ и дошкольных учреждений, объектов культуры, здравоохранения и множество производственных сооружений.

В 1996 г. Мухамед Нурғалиевич защитил кандидатскую диссертацию по теме «Совершенствование организации производства строительных материалов на базе энерго- и ресурсосберегающих технологий», а в 2005 г. – докторскую диссертацию по теме «Разработка энерго- и ресурсосберегающих строительных изделий, зданий и сооружений».

Совмещая интенсивную работу в строительной отрасли с преподавательской и научно-исследовательской деятельностью, профессор кафедры строительного производства КБГУ М. Н. Кокоев издал более 180 публикаций, в том числе 18 монографий. По результатам научных исследований имеет четыре патента на изобретения. Является советником РААСН, действительным членом РАЕН, членом-корреспондентом Российской инженерной академии. Участвовал в выполнении научных исследований по координационным планам важнейших отраслевых НИР: «Свой дом», «Жилище», «Энергосбережение» и др.

Исследования М. Н. Кокоева позволили найти новые перспективные направления, в том числе исследование многослойных конструкций из электростатического бетона со слоями переменного состава; вакуумно-порошковые теплоизоляционные изделия строительного назначения; высоковакуумные теплоизоляционные изделия и области их применения в строительстве и промышленности.

Редколлегия и редакция журнала «Промышленное и гражданское строительство» сердечно поздравляют уважаемого Мухамеда Нурғалиевича с юбилеем и желают ему новых успехов в его профессиональной деятельности, доброго здоровья и благополучия.

Итоги фестиваля «Архитектурное наследие 2021»

24–26 июня 2021 г. в Калининграде состоялся IV Всероссийский фестиваль «Архитектурное наследие 2021», при проведении которого архитекторы и реставраторы обсуждали насущные проблемы сохранения историко-культурного достояния страны.

Организатор фестиваля: Союз архитекторов России при поддержке Министерства культуры РФ, правительства и Министерства по культуре и туризму Калининградской обл., правительства Москвы и Комитета по архитектуре и градостроительству г. Москвы.

Тема фестиваля — **«Историческое наследие и комфортная среда обитания»**. Куратор фестиваля — председатель Совета по наследию Союза архитекторов России И. А. Маркина. Современная архитектура и градостроительство должны быть ориентированы в первую очередь на сохранение памятников архитектуры и исторического облика поселений, на создание качественно нового гармоничного и комфортного пространства. В манифесте куратора отмечается: «Наша цель — двигаться по пути прогресса, не деформируя историческую память места». Эта идея легла в основу концепции как всей фестивальной программы, так и каждого из направлений — от конкурсного до делового.

В деловой программе участвовало более 75 спикеров, в числе которых практикующие архитекторы и реставраторы, педагоги, представители научно-исследовательских организаций и члены общественных объединений. Было обсуждено множество самых острых проблем сохранения отечественного архитектурного наследия, одной из которых стала тема профильного образования. Преподаватели нескольких архитектурных вузов поделились примерами привлечения к реставрационной деятельности студентов, для которых учебная практика стала отправной точкой профессионального роста.

О плюсах и минусах статуса исторического поселения, а также о сложностях его монетизации специалисты обменялись мнениями в рамках дискуссии «Исторические поселения: сохранение и/или устойчивое развитие». Эксперты рассмотрели подводные камни этого неоднозначного «статуса», сравнив различные стратегии и механизмы защиты объекта культурного наследия. Участники деловой программы поделились опытом успешной реализации проектов по благоустройству территорий, обладающих редкими архитектурными ценностями, и рассказали о скрытых возможностях для формирования идентичности города и повышения качества среды.

О том, как одни и те же проблемы решаются на территории различных регионов страны, в своих презентациях рассказали представители Московской, Тюменской, Красноярской, Ярославской, Курской,

Вологодской, Калининградской, Псковской, Новосибирской и Костромской областей, Приморья, а также республик Дагестан и Карелии. Спикеры представили подробную информацию о проводимых мероприятиях по сохранению объектов культурного наследия регионального и местного значения, этапах разработки проектной документации, участии в государственных программах и получении грантов.

Одним из главных мероприятий деловой программы фестиваля стала научно-практическая конференция «Историческое наследие и комфортная среда обитания», которая прошла в конгресс-холле Музея Мирового океана. Была рассмотрена тема сохранения и поддержания исторической аутентичности города, что является ключом к дальнейшему его развитию.

На заседании «круглого стола» на тему: «Кенигсберг 1255 — Калининград 2021» были определены основные этапы становления и развития города с многовековой историей и сильной этнокультурной доминантой. Особое внимание специалисты уделили обсуждению процессов архитектурного формирования Калининграда, на которое оказали значительное влияние исторические события. По мнению участников заседания, местную реставрационную школу необходимо развивать, готовить профессиональные кадры, которые будут стоять на страже городских архитектурных сокровищ.

Подведение итогов конкурсной программы состоялось в Кафедральном соборе Калининграда. Главную награду «Архитектурного наследия» — Гран-при — получил коллектив бюро «Гинзбург Архитектс» за реставрацию одного из наиболее значимых памятников конструктивизма — Дома Наркомфина в Москве (см. «ПГС», 2021, № 2).

К не менее важным итогам фестиваля можно отнести озвученные в рамках дискуссий и «круглых столов» перспективные идеи развития объектов культурного наследия, а также обозначенные экспертами новые подходы и уникальные примеры, направленные на рост не только социокультурного, но и экономического значения территорий исторических поселений. Все это соответствует главной идее фестиваля «Архитектурное наследие» — поиску баланса между современной комфортной средой обитания и бережным отношением к искусству минувших эпох.

Ежегодный Всероссийский фестиваль, посвященный актуальным проблемам сохранения, реставрации и адаптации объектов культурно-исторического достояния как важнейшей составляющей жизни страны, проходил в качестве одного из плановых мероприятий Года архитектуры и градостроительства в СНГ.

**Лауреаты фестиваля
«Архитектурное наследие 2021»**

Самое большое количество работ было представлено на смотр-конкурс «**Лучший объект сохранения и развития**». По итогам работы жюри призовые места распределились следующим образом:

РАЗДЕЛ «ПРОЕКТ»

• **Номинация «Объекты гражданской архитектуры (в том числе культовые сооружения)»**

Бронзовый знак. Реставрация и приспособление объекта культурного наследия федерального значения «Здание городского театра 1911 г.» (ФГУП ЦНРПМ). Авторский коллектив: С. Б. Куликов, А. С. Куликов, Е. А. Антонова, К. О. Ахапкина, В. А. Баженова, А. Г. Семенова, И. А. Чуканова.

• **Номинация «Объекты промышленной архитектуры»**

Золотой знак. Концепция по приспособлению объекта культурного наследия местного (муниципального) значения «Пивоваренный завод «Понарт» 1849 г.» (ООО «Селен»). Авторский коллектив: Е. М. Сенилова, А. В. Евсеева, В. Е. Шкондин, Д. М. Аббаев, Р. А. Сапаров, Е. А. Тарбева.

Серебряный знак. Сохранение и приспособление корпуса мукомольной мельницы торгового дома «Емельян Башкиров с сыновьями» (ООО «АС-студия»). Авторский коллектив: С. Н. Авдеев, А. А. Черепушкина, А. А. Ильина, Е. В. Косыгин, А. М. Спиридонов, Е. А. Конюхова, С. В. Смирнова, Д. С. Лифанова.

Бронзовый знак. Форт «Александр I» (Форт «Чумной») (ФГУП ЦНРПМ). Авторский коллектив: Д. И. Антропов, К. В. Лелюк, Д. Т. Схулухия, Е. В. Данилова, Ю. А. Козловцева, Ю. А. Корженевская, И. Л. Большаков, Д. В. Грибов, А. В. Чайка, А. А. Воронина, Р. В. Сайфулин, О. В. Алимova.

• **Номинации «Регенерация исторической застройки и объекты ландшафтной архитектуры»**

Золотой знак. Культурно-образовательный кластер «Бахрушин» (ГБУ «ГлавАПУ»). Авторский коллектив: Д. В. Чумачков, И. В. Егоров, А. Г. Дедков, Е. Ю. Корниенко, А. В. Богодаева, И. Ф. Коршаков, Ю. С. Волкова, А. И. Гук, О. М. Чентемирова, Д. В. Марачев, Н. В. Сиваков, А. Д. Короткова, А. В. Демидов, А. М. Тимонов, Г. Л. Аракелова, У. Н. Клепова, М. С. Полежаикина, А. В. Рекуданов, А. А. Костина.

Серебряный знак. Каркас общественных пространств исторического центра г. Черняховска Калининградской обл. (архитектурно-инженерное бюро «ПРЕГОЛА»). Авторский коллектив: проф. Ю. Венцель, Н. В. Куницкая, В. С. Стяжкина.

Бронзовый знак. Достопримечательное место и музей-заповедник на Поле Ратной Славы «Ледовое побоище» 1242 г. в Гдовском районе Псковской обл. (Институт по реставрации памятников истории и культуры «Спецпроектреставрация» и ООО «Экокультура»). Авторский коллектив: Е. В. Пуришева, Н. Л. Заонегина, Г. А. Зайцева, И. И. Лагунин, В. А. Аракчеев, М. В. Вержбицкая.

РАЗДЕЛ «РЕАЛИЗАЦИЯ»

• **Номинация «Объекты гражданской архитектуры (в том числе культовые сооружения)»**

Золотой знак. Реставрационные и архитектурные решения Дома Наркомфина (Бюро «Гинзбург Архитектс»). Авторский коллектив: А. В. Гинзбург, Н. Б. Шилова, М. В. Кузина, И. Б. Тунина, Е. А. Щеголева, М. Б. Гурьевич, А. С. Баранихин, Д. Е. Рассказчикова, Е. Л. Ковтунец, Е. А. Гурьянова, К. А. Медведева, Е. В. Федоровская, Г. Е. Барханов; конструктивные решения — Е. И. Николаева, Е. А. Бобрикова (ООО «ПФ-ГРАДО»).

Серебряный знак. Главный учебный корпус Высшей школы менеджмента СПбГУ на базе дворцово-паркового ансамбля «Михайловская дача» (АБ «Студия 44»). Авторский коллектив: Н. И. Явейн, П. С. Соколов, Ж. В. Разумова, В. И. Парфенов, Г. В. Иванов, Н. В. Жуков, А. С. Скорин, А. А. Смирнова, Ю. Н. Комарова, Т. А. Кондратьева, О. А. Кузеванов, С. В. Морозова, Е. Г. Сорокина, Е. В. Шипова, И. Я. Ляшко, И. А. Никулина, Н. В. Просветова, И. А. Грачева, Д. Ю. Ярошевский, Н. Г. Полякова, М. В. Тараканова.

Бронзовый знак. Колокольня XVI—XIX вв. ансамбля Вологодского кремля. Реставрация и приспособление (АУК ВО «Вологдареставрация»). Авторский коллектив: Е. М. Никитина, Н. В. Коновалов, А. М. Куцобин, И. В. Клевцова, А. С. Барболина-Лойко, Н. О. Петрова, А. М. Дворник, Н. В. Петухова, И. Б. Сергачева.

• **Номинация «Объекты промышленной архитектуры»**

Золотой знак. Выполнение работ по приспособлению объекта культурного наследия федерального значения «Опора ЛЭП НигРЭС конструкции инженера В. Г. Шухова, 1927—1929 гг.» для современного использования (ЗАО «СМУ-77»). Авторский коллектив: В. А. Молоканов, П. А. Селезнева, Д. А. Кашаев.

• **Номинация «Регенерация исторической застройки и объекты ландшафтной архитектуры»**

Золотой знак. Комплексный подход при ревитализации квартала в историческом центре г. Черняховска Калининградской обл. (администрация муниципального образования «Черняховский городской округ»). Авторский коллектив: А. С. Кобзев, А. В. Литвин, А. А. Андрианова, А. В. Шеметова, Н. Хаддад.

Серебряный знак. Административно-общественный комплекс на базе исторической деревянной застройки в г. Красноярске с сохранением объектов культурного наследия путем приспособления их для современного использования (АО «Исторический квартал»). Авторский коллектив: Г. Ф. Андреев, С. А. Соснин, Л. М. Сергеева, А. Ю. Недашковский.

В смотре-конкурсе «**Культурное наследие регионов России**» приняли участие 13 субъектов РФ, продемонстрировавших региональные проекты и программы по сохранению объектов архитектурного наследия. Обсудив представленные на конкурс экспозиции и руководствуясь выработанными критериями оценки материала, жюри приняло решение объединить все номинации и отметить золотыми дипломами следующих участников:

- г. Дербент, Республика Дагестан и Управление архитектуры и градостроительства г. Дербента;
- Вологодская обл. и Комитет по охране объектов культурного наследия Вологодской обл.;
- Тюменская обл. и администрация г. Тобольска.

Дипломами Союза архитекторов России награждены:

- Республика Карелия и Управление по охране объектов культурного наследия Республики Карелии за сохранение и восстановление памятников деревянного зодчества;
- Костромская обл. и Областное государственное бюджетное учреждение «Наследие» за бережное отношение к памятникам археологии;
- Красноярский край, Служба по государственной охране объектов культурного наследия Красноярского края и АО «Исторический квартал» за частную инициативу реставрации храма и воссоздания среды.

Среди регионов, отмеченных дипломами за участие:

- Раменский городской округ Московской обл., Ар-

хитектурно-дизайнерская студия «САД КАМНЕЙ», ГУАиГ Раменского городского округа, ООО «Усадьба»;

- г. Углич, Ярославская обл. и Фонд архитектуры исторического Углича;
- Новосибирская обл. и Государственное автономное учреждение «Научно-производственный центр по сохранению историко-культурного наследия Новосибирской обл.»;
- Псковская обл. и Комитет по охране объектов культурного наследия Псковской обл.;
- Курская обл. и Комитет по охране объектов культурного наследия Курской обл.;
- Калининградская область и Благотворительный фонд Андрея Горохова;
- Приморский край, г. Владивосток, Инспекция по охране объектов культурного наследия Приморского края, ООО «АЛЪЯНС-ПРИМ», ООО «Турмалин-Проект».

Официальный сайт: www.archnasledie.ru.

*(По материалам пресс-службы
Союза архитекторов России)*

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

НАПОМИНАЕМ, ЧТО ОФОРМИТЬ ПОДПИСКУ НА ЖУРНАЛ
«ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»
МОЖНО НАЧИНАЯ С ЛЮБОГО МЕСЯЦА В ЛЮБОМ ОТДЕЛЕНИИ СВЯЗИ
ИЛИ В РЕДАКЦИИ, А ТАКЖЕ ПОДПИСАТЬСЯ НА ЭЛЕКТРОННУЮ ВЕРСИЮ ЖУРНАЛА.

ПОДПИСНЫЕ ИНДЕКСЫ ЖУРНАЛА В КАТАЛОГАХ:

- УРАЛ-ПРЕСС – **70695** • ПРЕССА РОССИИ – **91622** • ПОЧТА РОССИИ – **ПП983** •

ПОДПИСКА НА НАШ ЖУРНАЛ, ВХОДЯЩИЙ В ЧИСЛО ВЕДУЩИХ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДАНИЙ ПО СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕМАТИКЕ, –
ЭТО ВАШ ВКЛАД В РАЗВИТИЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ.

ПОЛНЫЕ ТЕКСТЫ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ В ЖУРНАЛЕ
«ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО» в 2010–2020 гг.,
ПРЕДСТАВЛЕНЫ НА САЙТЕ ЖУРНАЛА В РАЗДЕЛЕ «АРХИВ».

ЖУРНАЛ «ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО» ИНДЕКСИРУЮТ:

НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА
eLIBRARY.RU

Russian Science Citation
Index (RSCI) на платформе
Web of Science

 **ULRICHSWEB™**
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

САЙТ ЖУРНАЛА «ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»: www.pgs1923.ru



SCAD Office

www.scadsoft.com

ОТКОС



ООО "АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТНЫХ РАБОТ"

Сертификат соответствия:
RA.RU.A686.H01187 действует до 07.08.2022г

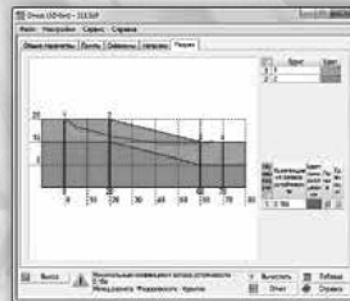
Программа **ОТКОС** предназначена для определения коэффициента запаса устойчивости откосов и склонов, при этом пользователь имеет возможность сравнить результаты расчета на основе восьми методик анализа устойчивости откосов. В качестве механизма потери устойчивости принимается механизм скольжения оползающего массива относительно неподвижной части откоса. Сопротивление сдвигу по поверхности скольжения рассчитывается для статических условий. Вдоль всей поверхности выдерживается критерий разрушения грунта, принимаемый в виде закона Кулона.

Реальное сдвигающее напряжение, получаемое расчетом, сопоставляется с предельным сопротивлением сдвигу, и результат этого сравнения выражается в виде коэффициента запаса устойчивости K . Коэффициент запаса устойчивости склона (откоса) – это минимальный из коэффициентов запаса устойчивости по всем возможным поверхностям скольжения, удовлетворяющим заданным ограничениям, заложенным в методе расчета.

Исходные данные включают:

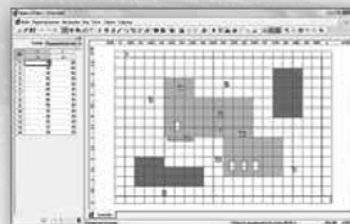
- размеры оползневого участка склона;
- глубину закола (если активен маркер наличия закола);
- характеристики грунтов;
- положение и характеристики скважин;
- нагрузки, действующие на указанные участки склона.

По результатам расчета может быть сформирован отчет в формате RTF.



Параметры скелета

| Группы | Минимальная | Максимальная | Средняя | Среднее значение |
|-------------|-------------|--------------|---------|------------------|
| 1. Грунт C2 | 33.3 | 0 | | |
| 2. Грунт C3 | 38.5 | 0 | | |
| 3. Грунт C4 | 12.5 | 0 | | |
| 4. Грунт C5 | 40 | 0 | | |
| 5. Грунт C6 | 18.8 | 0 | | |
| 6. Грунт C7 | 25.0 | 0 | | |



КРОСС

Программа **КРОСС** предназначена для определения коэффициентов постели для расчета фундаментных конструкций на упругом винклеровском основании на основе моделирования работы многослойного грунтового массива. Геологическая структура грунтового массива предполагается произвольной и восстанавливается по данным инженерно-геологических изысканий.

В основу расчета положен предложенный в НИИОСП (В.Г.Федоровским) метод расчета осадок, основанный на послойном суммировании с учетом структурной прочности грунта

Рассматривается площадка строительства, на которой расположено проектируемое сооружение и другие объекты (существующие здания, котлованы), влияющие на него в том смысле, что нагрузки на грунт, передаваемые этими объектами, могут привести к осадкам проектируемого фундамента. Кроме того, считается, что известны результаты геологических изысканий, которые представлены в виде информации о характеристиках грунта в пробуренных скважинах.

Графические интерактивные средства обеспечивают формирование произвольных конфигураций зданий на площадке строительства. Информация о расположении пробуренных скважин и характеристиках грунта позволяет построить на экране разрез грунтового массива.

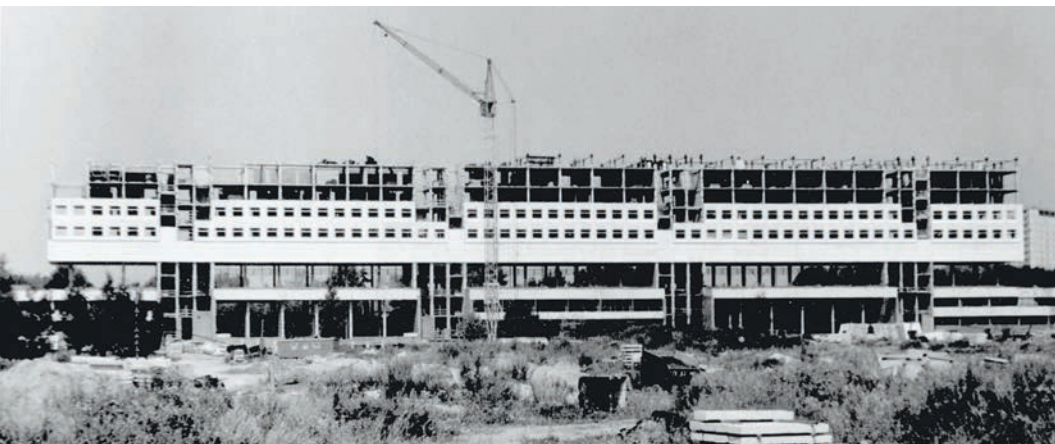
В результате работы программы **КРОСС** подбираются значения коэффициентов постели C_1 (модель винклеровского основания), которые дают такие же осадки, как и при использовании схемы линейно-деформируемого полупространства, т.е. обеспечивается соответствие с моделями, рекомендуемыми СНиП.

Полученные значения коэффициентов постели графически отображаются в любой точке под фундаментной плитой, которые автоматически можно передать в программный комплекс SCAD для использования в расчетах с учетом влияния характеристик грунтового основания.



Адрес: 105082, Россия, г. Москва, Рубцовская набережная, 4, корп. 1, помещение VII. Тел/факс: +7 (499) 267 40 76; тел.: +7 (499) 940 88 27/29
E-mail: scad@scadsoft.ru

НА ПРАВАХ РЕКЛАМЫ



НА ПРАВАХ РЕКЛАМЫ



