

ИТС

ПРОМЫШЛЕННОЕ
И ГРАЖДАНСКОЕ
СТРОИТЕЛЬСТВО

5/2022

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Строим будущее
вместе!



190





Уважаемые коллеги и друзья!

В 2022 году Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет – старейший университет России по подготовке специалистов для строительной отрасли – празднует 190-летний юбилей.

Университет является продолжателем известной школы российских гражданских инженеров и за свою историю подготовил более 80 000 выпускников в области архитектуры и градостроительства, реконструкции и реставрации архитектурного наследия, строительства, жилищно-коммунального хозяйства и автомобильно-дорожного комплекса. Труд выпускников университета вносит значи-

тельный вклад в развитие и процветание России и способствует достижению национальной цели создания комфортной и безопасной среды для жизни.

СПбГАСУ – крупный учебный и научный центр. В нем обучается более 11 000 российских и 800 иностранных студентов, более 200 аспирантов и докторантов. На шести факультетах трудится более 500 профессоров, доцентов и преподавателей. На кафедрах и в научно-технических центрах проводятся исследования по актуальным и востребованным направлениям развития экономики и строительной отрасли.

Университет занимает высокие позиции в предметных и институциональных российских и международных рейтингах, что является общественным признанием его вклада в социально-экономическое развитие России и Северо-Западного федерального округа, а также плодотворного труда его коллектива.

СПбГАСУ продолжает свое развитие, ставит новые цели и адекватно отвечает на различные вызовы. Активно работает с органами власти, работодателями, научными и образовательными организациями.

В этом непростом и динамично меняющемся мире университет, как и ранее, приложит все усилия для развития и процветания России, создания комфортных условий для проживания россиян в благоустроенных городах.

Сердечно поздравляю со славным юбилеем ветеранов университета, его выпускников, преподавателей, сотрудников и студентов! Выражаю уверенность в достижении поставленных целей развития на благо Отечества.

**Ректор СПбГАСУ, доктор экономических наук, профессор,
почетный член РААСН, вице-президент АСВ**

Е. И. Рыбнов

СОУЧРЕДИТЕЛИ:

Российское общество инженеров строительства, Российская инженерная академия

СОДЕРЖАНИЕ**СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ**К расчету железобетонной биологической защиты сферического реактора
Морозов В. И., Пухаренко Ю. В., Хегай Е. О. _____ **4**Стабилизация структуры твердеющего высокопрочного бетона армирующими волокнами
Пухаренко Ю. В., Ковалева А. Ю., Сидорова А. С., Эшанзада С. М. _____ **9****ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ**Теплотехническое влияние фундамента на глубину промерзания и оттаивания грунтов
Бояринцев А. В., Ланько С. В., Зыбцева А. В. _____ **14**Выбор основания фундаментов с учетом геологических и расчетных условий
Конюшков В. В. _____ **24****ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА**Изыскания и ликвидация загрязнений грунтовых вод
Корнеева Е. А., Авсюкевич А. П., Кудрявцев А. В. _____ **31****ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА**Моделирование бесканальной прокладки теплопроводов в районах
многолетнемерзлых грунтов. *Пухкал В. А.* _____ **38**Развитие и становление вибрационной техники и технологий для специальных
строительных работ. *Верстов В. В., Гайдо А. Н.* _____ **43****ПОЖАРНАЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**Расчетные величины пожарного риска при авариях на наружных газопроводах
Глуханов А. С., Цаплин В. В. _____ **50****ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**Импортозамещение программного обеспечения информационного моделирования
зданий и сооружений
Петров Д. С., Шумилов К. А. _____ **55****ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ**Прогнозирование жизненного цикла дорожных одежд нежесткого типа
Клековкина М. П., Бондарева Э. Д. _____ **61****ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ,
СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ**Влияние сооружений на сетях канализации на качество атмосферного воздуха
Телятникова А. М., Федоров С. В., Шабалин В. В. _____ **66**Предотвращение заиливания осадком ливневой насосной станции
Федоров С. В., Столбихин Ю. В., Шабалин В. В. _____ **72****СПОНСОРЫ И ПАРТНЕРЫ**Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы,
РААСН, НИУ МГСУ, Комитет Торгово-промышленной палаты РФ по предпринимательству в сфере строительства,
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. БАЛЬЗАННИКОВ, доктор технических наук (Самара)

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)

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,
академик 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)

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 23.05.2022 г. Бумага мелованная. Формат 60×88 1/8. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10. Цена 1795 р. Заказ № 205

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. 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)

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, Academician of the Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences
(St. Petersburg, Russian Federation)

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

P. P. OLEYNIK, DSc (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**BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS**

To the Calculation of Reinforced Concrete Biological Protection of a Spherical Reactor
Morozov V. I., Pukharensko Yu. V., Khegay E. O. _____ **4**

Stabilization of the Structure of Hardening High-Strength Concrete With Reinforcing Fibers
Pukharensko Yu. V., Kovaleva A. Yu., Sidorova A. S., Eshanzada S. M. _____ **9**

BASES AND FOUNDATIONS, UNDERGROUND STRUCTURES

The Thermal Engineering Influence of the Foundation on the Depth of Freezing and Thawing of Soils
Boyarintsev A. V., Lanko S. V., Zybtsava A. V. _____ **14**

Selection of the Base of Foundations Taking Into Account Geological and Design Conditions
Konyushkov V. V. _____ **24**

ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTION AND MUNICIPAL FACILITIES

On the Issue of Search for and Elimination of Groundwater Pollution
Korneeva E. A., Avsyukevich A. P., Kudryavtsev A. V. _____ **31**

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION

Modeling of Channel-Free Laying of Heat Pipelines in Areas of Permafrost Soils
Pukhakal V. A. _____ **38**

Development and Formation of Vibration Equipment and Technologies for Special Construction Works. *Verstov V. V., Gaido A. N.* _____ **43**

FIRE AND INDUSTRIAL SAFETY

Calculated Values of Fire Risk in Case of Accidents on External Gas Pipelines
Glukhanov A. S., Tsaplin V. V. _____ **50**

INFORMATION SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Import Substitution of Information Modeling Software for Buildings and Structures
Petrov D. S., Shumilov K. A. _____ **54**

ROAD DESIGN AND CONSTRUCTION

Forecasting the Life Cycle of Non-Rigid Pavements. *Klekovkina M. P., Bondareva E. D.* _____ **61**

**WATER SUPPLY, SEWERAGE,
BUILDING SYSTEMS OF WATER RESOURCES PROTECTION**

The Influence of Structures on Sewer Networks on the Quality of Atmospheric Air
Telyatnikova A. M., Fedorov S. V., Shabalin V. V. _____ **66**

Prevention of the Stormwater Pumping Station Silting-Up
Fedorov S. V., Stolbikhin Iu. V., Shabalin V. V. _____ **72**

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, TSNIIPromzdany, JSC Research Center of Construction, Research Institute of Building Constructions named after V. A. Koucherenko

УДК 621.039.538:691.32.001.24

doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.04-08

К расчету железобетонной биологической защиты сферического реактора

Валерий Иванович МОРОЗОВ, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, morozov@spbgasu.ru

Юрий Владимирович ПУХАРЕНКО, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, tsmm@spbgasu.ru

Евгений Олегович ХЕГАЙ, аспирант, genehegay1235@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ),
190005 Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

Аннотация. Атомная энергетика – важнейшая отрасль глобальной энергетики. Себестоимость электроэнергии, вырабатываемой на атомных электростанциях, а также отсутствие выбросов аэрозолей и парниковых газов в атмосферу являются одними из ключевых факторов, благодаря которым можно говорить о серьезной конкуренции с другими видами электростанций. Вопросы безопасности, связанные с радиационным воздействием, решаются с использованием биологической защиты в виде толстостенной железобетонной оболочки, толщина стенки которой достигает 3–3,5 м. Статья посвящена созданию аналитического приближенного расчета толстостенной сферической оболочки с одиночным армированием. Ранее была обнаружена эффективность применения сферических толстостенных оболочек в качестве полярно-симметричных оболочек. В основу метода расчета положены некоторые предложения применительно к реакторам цилиндрической формы. Суть этих предложений состоит в использовании уравнений теории упругости для описания сжатых областей, при этом в растянутой области учитывается только слой арматуры, который также считается упругим и однородным. Для полярно-симметричной оболочки решение приводится впервые.

Ключевые слова: сферическая оболочка реактора, биологическая защита, сжатая область, арматурный слой, уравнения теории упругости

Для цитирования: Морозов В. И., Пухаренко Ю. В., Хегай Е. О. К расчету железобетонной биологической защиты сферического реактора // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 5. С. 4–8.
doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.04-08

TO THE CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE BIOLOGICAL PROTECTION OF A SPHERICAL REACTOR

Valeriy I. MOROZOV, morozov@spbgasu.ru

Yuriy V. PUKHARENKO, tsmm@spbgasu.ru

Evgeniy O. KHEGAY, genehegay1235@mail.ru

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-ya Krasnoarmeyskaya ul., 4,
St. Petersburg 190005, Russian Federation

Abstract. Nuclear energy is the most important branch of global energy. The cost of electricity generated at nuclear power plants, as well as the absence of emissions of aerosols and greenhouse gases into the atmosphere are among the key factors that make it possible to talk about serious competition with other types of power plants. Safety issues related to radiation exposure are solved using biological protection in the form of a thick-walled reinforced concrete shell, the wall thickness of which reaches 3–3.5 m. The article is devoted to the creation of an analytical approximate calculation of a thick-walled spherical shell with a single reinforcement. Earlier, the effectiveness of using spherical thick-walled shells as polar-symmetric shells was discovered. The calculation method is based on some proposals in relation to cylindrical reactors. The essence of these proposals is to use the equations of elasticity theory to describe compressed areas, while in the stretched area only the reinforcement layer is taken into account, which is also considered elastic and homogeneous. For the polar-symmetric shell, the solution is given for the first time.

Keywords: spherical reactor shell, biological protection, compressed area, reinforcement layer, equations of elasticity theory

For citation: Morozov V. I., Pukharenko Yu. V., Khagai E. O. To the Calculation of Reinforced Concrete Biological Protection of a Spherical Reactor. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2022, no. 5, pp. 4–8. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.04-08

Введение

Атомная энергетика – важнейшая отрасль глобальной энергетики. Себестоимость электроэнергии, вырабатываемой на атомных электростанциях (АЭС), а также отсутствие выбросов аэрозолей и парниковых газов в атмосферу являются одними из ключевых факторов, благодаря которым можно говорить о серьезной конкуренции с другими видами электростанций.

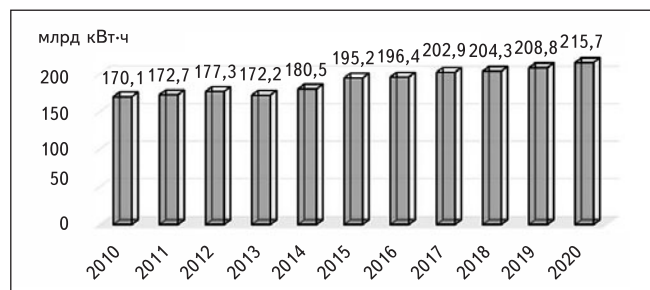
На сегодняшний день в России эксплуатируются 38 энергоблоков, общей мощностью 31 ГВт, расположенных на 11 действующих АЭС [1].

По данным годовых отчетов АО «Атомэнергопром», в 2019 г. доля атомной энергетики от общей выработки объединенных энергетических систем составила 19,71 %, большая часть которых приходится на европейскую часть России [2].

На *рис. 1* изображена гистограмма, на которой можно проследить стабильный рост выработки электроэнергии на АЭС за период с 2010 г. до 2020 г. Согласно распоряжению правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р «Об Энергетической стратегии России на период до 2030 года» должно увеличиться производство электроэнергии на атомных электростанциях до 355–436 ГВт·ч в год.

В каждом ядерном реакторе АЭС предусмотрена биологическая защита, которая снижает потоки излучений до допустимого уровня, и тепловая защита, предохраняющая ответственные конструктивные элементы реактора от перегрева и радиационных повреждений. Материал бетонной защиты поглощает большое количество энергии излучений, что, в свою очередь, ведет к развитию высокой температуры и температурных перепадов, которые приводят к появлению и развитию значительных температурных напряжений [3]. На *рис. 2* показан характерный вид графиков изменения температуры по толщине боковой защиты (биозащиты) [4]. Заметим, что биологическая защита не испытывает силовых воздействий, кроме тех, что связаны с температурой. Последняя представлена в виде полярно-симметричного температурного поля.

Рис. 1. Выработка электроэнергии на АЭС в России, млрд кВт·ч



Температуру в бетоне обуславливают три основных фактора:

- передача тепла от внутреннего пространства;
- тепловыделение бетона, вызванное экзотермией цемента;
- тепловыделение самого бетона, в результате поглощения нейтронов, бета- и гамма-излучений.

Цель настоящей работы – создание методики аналитического приближенного расчета толсто-стенной сферической полярно-симметричной оболочки для биологической защиты реактора АЭС.

Основная часть

Рассматривается бетонная биологическая защита реактора АЭС с расчетной схемой в виде поллой толсто-стенной сферы с внутренним радиусом (a , м) и наружным радиусом (b , м) в условиях полярно-симметричного теплового воздействия. Подобная задача решена в работах А. В. Хольцова и В. И. Морозова [4, 5] для цилиндрического реактора. Значения температуры известны, и закон ее распределения по толщине может быть любым осесимметричным. В кольцевом (окружном) направлении в растянутой зоне выполнено одиночное армирование.

Основные допущения [6]:

- в первом приближении считаем, что свойства бетона (E – модуль упругости; α – коэффициент линейного температурного расширения) не зависят от температуры и напряженного состояния и считаются постоянными;
- напряженно-деформированное состояние сжатой зоны сферической оболочки может быть описано уравнениями теории упругости изотропного однородного тела;
- в растянутой зоне работа бетона не учитывается на растяжение, и все усилия воспринимаются только арматурой.

Таким образом, сжатая область оболочки описывается уравнениями теории упругости для изотропного однородного полярно-симметричного тела, а в растянутой зоне учитывается только арматурный слой, что отличает задачу в варианте со сплошным армированием от варианта с дисперсным (см. [5]).

Далее приводится решение задачи о термонапряженном состоянии двухслойной полярно-симметричной оболочки, состоящей из внутреннего сжатого слоя бетона и наружного растянутого арматурного слоя в окружном направлении. Слои со-стыкованы посредством выравнивания относительных деформаций при их контакте.

Рассмотрим сжатую зону сферы на участке $a \leq r \leq r_0$, где r – текущий радиус; r_0 – радиус нейтральной оси для кольцевого направления.

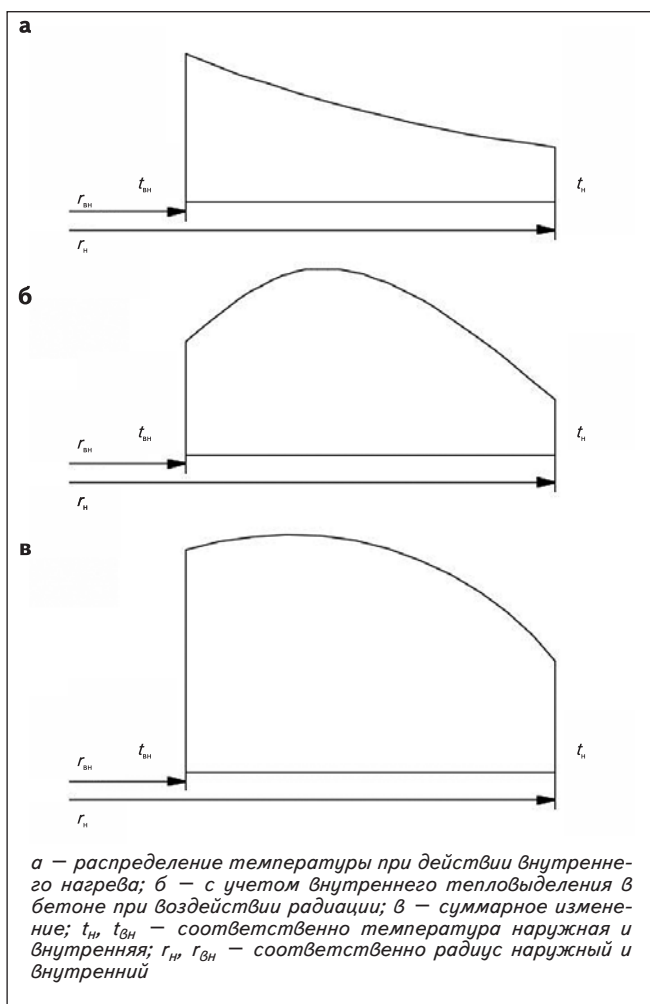


Рис. 2. Графики изменения температуры по толщине боковой защиты

Уравнение равновесия в напряжениях для толстостенной сферы [6] можно записать в виде:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2}{r}(\sigma_r - \sigma_\theta) = 0, \quad (1)$$

где σ_r – напряжения в радиальном направлении, МПа; σ_θ – напряжения в окружном направлении, МПа; r – текущий радиус, м.

Запишем уравнение совместности деформаций:

$$\varepsilon_\theta - \varepsilon_r + r \frac{d\varepsilon_\theta}{dr} = 0, \quad (2)$$

где ε_θ – деформации в окружном направлении; ε_r – деформации в радиальном направлении.

Формула (2) выведена из известных зависимостей Коши:

$$\varepsilon_r = du/dr; \quad (3) \quad \varepsilon_\theta = u/r, \quad (4)$$

где u – радиальное перемещение.

Связь деформаций с напряжениями представле-

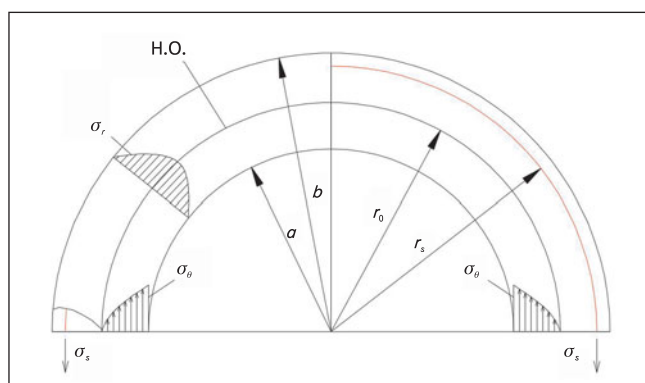


Рис. 3. Схема напряженного состояния сферы при внутреннем нагреве

на в виде обобщенного закона Гука для изотропного тела:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - 2\nu\sigma_\theta) + \alpha T; \quad (5)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)) + \alpha T, \quad (6)$$

где ν – коэффициент Пуассона материала; T – температурная функция.

Совместное решение уравнений (1), (2) и (5), (6) дает уравнения для определения напряжений:

$$\sigma_r = -\frac{2\alpha E}{1-\nu} \frac{1}{r^3} \int_a^r Tr^2 dr + \frac{EC_1}{1-2\nu} - \frac{2EC_2}{1+\nu} \frac{1}{r^3}; \quad (7)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{1}{r^3} \int_a^r Tr^2 dr + \frac{EC_1}{1-2\nu} + \frac{EC_2}{1+\nu} \frac{1}{r^3} - \frac{\alpha ET}{1-\nu}, \quad (8)$$

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования, которые находятся из соответствующих граничных условий: внутренние и наружные поверхности сферы свободны от внешних радиальных воздействий, т. е. давление по поверхностям равно 0.

Из формулы (7) можно составить систему уравнений для нахождения значений постоянных интегрирования:

$$\begin{cases} \sigma_{r,r=a} = \frac{EC_1}{1-2\nu} - \frac{2EC_2}{1+\nu} \frac{1}{a^3} = 0 \\ \sigma_{r,r=b} = -\frac{2\alpha E}{1-\nu} \frac{1}{b^3} \int_a^b Tr^2 dr + \frac{EC_1}{1-2\nu} - \frac{2EC_2}{1+\nu} \frac{1}{b^3} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Решая систему уравнений (9) с учетом (7) и (8), можно найти значения радиальных и окружных напряжений на заданном участке.

Рассмотрим растянутую зону сферы на участке $r_0 < r \leq b$. Внешний слой сферы подвержен сжатию в радиальном направлении и растяжению в окружном. На радиусе нейтральной оси кольцевые напряжения равны 0. Подставляя r_0 в формулу (8), получаем:

Анализ результатов расчетов (в числителе – теоретические значения (цилиндр) [5], в знаменателе – полученные значения (сфера))

Радиус слоя, мм	Радиальные перемещения, мм	Тангенциальные деформации, 10^5	Радиальные напряжения, МПа	Кольцевые напряжения, МПа
230	0,081/0,064	-42/-50	0/0	-13,6/-14,4
250	0,098/0,08	-21/-29	-0,85/-1,7	-7,8/-8,6
270	0,111/0,09	-5/-13	-1,19/-2,4	-3,3/-4
290	0,119/0,097	14/0	-1,2/-2,3	-1,4/-0,4
310	0,124/0,1	14/5,5	-1/-1,9	52,6/36,1
330	0,127/0,101	14/5,5	-0,66/-1,2	52,6/36,1
350	0,127/0,101	14/5,5	-0,24/-0,4	52,6/36,1
360	0,127/0,101	14/5,5	0/0	52,6/36,1

Примечание. Для сравнения: согласно опытным данным (цилиндр) [5], для радиуса слоя 360 мм радиальные перемещения равны 0,144 мм, а тангенциальные деформации равны $38 \cdot 10^5$.

$$\sigma_{\theta, r=r_0} = \frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{1}{r_0^3} \int_a^{r_0} T r^2 dr + \frac{E C_1}{1-2\nu} + \frac{E C_2}{1+\nu} \frac{1}{r_0^3} - \frac{\alpha E T}{1-\nu} = 0, \quad (10)$$

Решая уравнение (10) относительно r_0 , получаем значение радиуса нейтральной оси.

Деформацию арматуры можно выразить через перемещения:

$$\varepsilon_s = u/r_s, \quad (11)$$

где r_s – радиус арматуры растянутой зоны.

Радиальные перемещения арматуры определяются по формуле

$$u = u_0 + \alpha_s \int_{r_0}^{r_s} T dr, \quad (12)$$

где u_0 – радиальные перемещения нейтрального слоя; α_s – коэффициент линейного температурного расширения арматуры.

Радиальные перемещения нейтрального слоя вычисляются по формуле

$$u_0 = \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha \frac{1}{r_0^2} \int_a^{r_0} T r^2 dr + C_1 r_0 + \frac{C_2}{r_0^2}. \quad (13)$$

По закону Гука напряжения в арматуре находятся по формуле

$$\sigma_s = E_s (\varepsilon_s - \alpha_s T). \quad (14)$$

Подставляя выражение (12) в (11), а (11) в (14), приходим к виду:

$$\sigma_s = E_s \left(\frac{u_0}{r_s} + \frac{1}{r_s} \alpha_s \int_{r_0}^{r_s} T dr - \alpha_s T \right). \quad (15)$$

Зная значение радиуса нейтральной оси, полученное из уравнения (10), можно найти по формуле (15) значение напряжения в растянутой зоне сферы.

Для проверки полученных формул выполним пример расчета сферической оболочки при следующих исходных данных: $a = 0,23$ м, $b = 0,36$ м, $r_s = 0,33$ м. Линейная температурная функция:

$$T(r) = \frac{(T_1 - T_2)a}{b-a} \left(\frac{b}{r} - 1 \right),$$

где $T_1 = 100$ °С – температура на внутреннем радиусе сферы; $T_2 = 20$ °С – температура на наружном радиусе сферы.

В первом приближении можно найти все компоненты напряжений в сжатой и растянутой зонах в радиальном и кольцевом направлениях сферы.

На рис. 3 представлена схема напряженного состояния сферы при внутреннем нагреве.

Обсуждение результатов

Согласно опытным данным, полученным в работе [5], радиальные перемещения в цилиндре наружного слоя равны $u = 0,144$ мм, а тангенциальные деформации $\varepsilon = 38 \cdot 10^5$ отн. ед. По формулам (7), (8) и (15) находим максимальное значение радиальных напряжений в сфере: $\sigma_r = -2,4$ МПа. Максимальное значение кольцевых напряжений в сжатой зоне: $\sigma_{\theta} = -14,4$ МПа. Напряжения в кольцевой арматуре, расположенной в растянутой зоне, равны $\sigma_s = 36,1$ МПа.

По формулам из работы [5] также найдем максимальное значение радиальных напряжений в цилиндре: $\sigma_r = -1,19$ МПа; максимальное значение кольцевых напряжений в сжатой зоне: $\sigma_{\theta} = -13,6$ МПа; напряжения в кольцевой арматуре, расположенной в растянутой зоне: $\sigma_s = 52,6$ МПа.

Анализ результатов расчетов и их сравнение с полученными опытными и теоретическими значениями в работе [5] представлен в *таблице*.

Сравнивая полученные численные результаты для сферической оболочки с экспериментальными данными, полученными для цилиндрического корпуса [5], можно сделать вывод о том, что рассматриваемая методика расчета дает адекватные значения.

Выводы

1. Изложенная методика основана на использовании теории упругости для описания напряжен-

но-деформированного состояния сжатой и растянутой зон, в последней из которых работа бетона не учитывается. Рассмотренная методика расчета дает адекватные значения с экспериментальными данными, полученными для цилиндрического корпуса в работе [5].

2. В дальнейших исследованиях по данной тематике необходимо учесть зависимость свойств материала, таких как модуль упругости и коэффициент линейного температурного расширения, от температуры, а также выполнить численный эксперимент в программных расчетных комплексах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. PRIS – Country Details [PRIS – сведения о стране] // PRIS – Power Reactor Information System [Информационная система PRIS – энергетический реактор]. URL: <https://pris.iaea.org/pris/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=RU> (дата обращения: 20.01.2022).
2. Годовые отчеты / Атомэнергпром. URL: <http://atomenergoprom.ru/ru/invest/annual/> (дата обращения: 20.01.2022).
3. Дубровский В. Б., Лавданский П. А., Нешумов Ф. С. [и др.]. Строительство атомных электростанций. М. : Энергоатомиздат, 1987. 248 с.
4. Хольцов А. В. О расчете железобетонной защиты

реактора на раскрытие трещин при температурных воздействиях // *Материалы и конструкции защит ядерных установок*. М. : МИСИ им. В. В. Куйбышева, 1972. № 99.

5. Морозов В. И. Исследование напряженно-деформированного состояния и трещиностойкости толстостенных цилиндрических конструкций из дисперсно-армированного железобетона с высоким содержанием арматуры при неравномерном нагреве. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009487789> (дата обращения: 20.01.2022).
6. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости / пер. с англ. М. : Наука, 1979. 560 с.

REFERENCES

1. PRIS – Country Details. PRIS – Power Reactor Information System. Available at: <https://pris.iaea.org/pris/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=RU> (accessed 20.01.2022).
2. *Godovye otchety* [Annual reports]. Atomenergoprom. Available at: <http://atomenergoprom.ru/ru/invest/annual/> (accessed 20.01.2022). (In Russ.).
3. Dubrovskiy V. B., Lavdanskij P. A., Neshumov F. S. et al. *Stroitel'stvo atomnyh elektrostanciy* [Construction of nuclear power plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 248 p. (In Russ.).
4. Hol'cov A. V. On calculation of reinforced concrete reactor protection for crack opening under temperature influences. *Materialy i konstrukcii zashchit yadernyh ustanovok* [Materials and designs of nuclear plant

protection]. Moscow, MISI im. V. V. Kujbysheva Publ., 1972. No. 99. (In Russ.).

5. Morozov V. I. *Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i treshchinostojkosti tolstostennyh cilindricheskikh konstrukcij iz dispersno-armirovannogo zhelezobetona s vysokim soderzhaniem armatury pri neravnomernom nagreve* [Investigation of the stress-strain state and crack resistance of thick-walled cylindrical structures made of dispersed reinforced concrete with a high reinforcement content under uneven heating]. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009487789> (accessed 20.01.2022).
6. Timoshenko S. P., Gud'er Dzh. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 560 p. (In Russ.).



**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (СПБГАСУ)**

Адрес: 190005 Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

Сайт: www.spbgasu.ru

УДК 691.328.44

doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.09-13

Стабилизация структуры твердеющего высокопрочного бетона армирующими волокнами

Юрий Владимирович ПУХАРЕНКО^{1,2}, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технологии строительных материалов и метрологии СПбГАСУ, главный научный сотрудник НИИСФ, tsik@spbgasu.ru

Анна Юрьевна КОВАЛЕВА¹, кандидат технических наук, доцент, kovalevaau@mail.ru

Анастасия Сергеевна СИДОРОВА¹, аспирантка, sidorovaas96@mail.ru

Саид Муджтаба ЭШАНЗАДА¹ (Афганистан), аспирант, e-mail: saidmujtabaa@gmail.com

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), 190005 Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), 127238 Москва, Локомотивный пр., 21

Аннотация. Рассмотрены результаты исследования косвенных показателей долговечности (водопоглощение, прочность) твердеющих высокопрочных бетонов путем испытания на атмосферостойкость. Приведены изменения указанных параметров бетонных и фибробетонных образцов в процессе ускоренных испытаний, имитирующих воздействие окружающей среды на их структуру и свойства в раннем возрасте. При этом образцы всех составов подвергались попеременному увлажнению и высушиванию при достижении возраста трех и семи суток в условиях нормального твердения. Установлено, что введение в состав высокопрочных бетонов неметаллических волокон (фибры), благодаря армирующему и модифицирующему эффектам, позволяет улучшить параметры структуры и увеличить прочность бетона, что предполагает повышение показателей долговечности и эксплуатационной надежности конструкции в целом.

Ключевые слова: показатели долговечности бетона, атмосферостойкость, полипропиленовое волокно, базальтовое волокно, высокомодульная фибра, армирование бетона

Для цитирования: Пухаренко Ю. В., Ковалева А. Ю., Сидорова А. С., Эшанзада С. М. Стабилизация структуры твердеющего высокопрочного бетона армирующими волокнами // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 5. С. 9–13. doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.09-13

STABILIZATION OF THE STRUCTURE OF HARDENING HIGH-STRENGTH CONCRETE WITH REINFORCING FIBERS

Yuri V. PUKHARENKO^{1,2}, tsik@spbgasu.ru

Anna Yu. KOVALEVA¹, kovalevaau@mail.ru

Anastasia S. SIDOROVA¹, sidorovaas96@mail.ru

Said Mujtaba ESHANZADA¹ (Afghanistan), saidmujtabaa@gmail.com

¹ Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-ya Krasnoarmeyskaya ul., 4, St. Petersburg 190005, Russian Federation

² Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Lokomotivnyy proezd, 21, Moscow 127238, Russian Federation

Abstract. An assessment of the effectiveness of fiber reinforcement in terms of neutralizing the destructive effects of the environment on hardening concrete at an early age is presented. The results of a study of indirect indicators of durability (water absorption, strength) of hardening high-strength concretes by testing for weather resistance are considered. Changes in the indicated parameters of concrete and fiber-reinforced concrete samples during accelerated tests simulating the impact of the environment on their structure and properties at an early age are presented. At the same time, samples of all compositions were subjected to alternate moistening and drying when they reached the age of three and seven days under conditions of normal hardening. It is established that the introduction of non-metallic fibers into the composition of high-strength concretes, due to the reinforcing and modifying effects, makes it possible to improve the parameters of the structure and increase the strength of concrete, which implies an increase in the durability and operational reliability of the structure as a whole.

Keywords: concrete durability indicators, weather resistance, polypropylene fiber, basalt fiber, high-modulus fiber, concrete reinforcement

For citation: Pukharenko Yu. V., Kovaleva A. Yu., Sidorova A. S., Eshanzada S. M. Stabilization of the Structure of Hardening High-Strength Concrete With Reinforcing Fibers. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2022, no. 5, pp. 9–13. (In Russ.) doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.09-13

Иntenсификация на всех этапах современного динамично развивающегося строительного производства является закономерным и неизбежным процессом. Неудивительно, что при возведении зданий и сооружений в условиях строительных площадок наблюдается тенденция к прекращению ухода за твердеющим бетоном, освобождению от опалубки и нагружению конструкций в раннем возрасте при условии достижения материалом прочности выше 70 % проектного класса, что не противоречит действующим нормам (п. 5.4.1 СП 70.13330.2012 «СНиП 3.03.01-87 Несущие и ограждающие конструкции»). При этом, если бетоны средней прочности на портландцементе без применения в составе активных минеральных или химических добавок-ускорителей в нормальных тепловлажностных условиях набирают указанную прочность примерно за 7 сут¹, то высокопрочный бетон может достигать таких значений прочности уже после 3 сут твердения.

Следовательно, руководствуясь упомянутым сводом правил, строители вправе прекратить уход за конструкциями из высокопрочного бетона через 72 ч, а в некоторых случаях и раньше. Однако даже ненагруженная конструкция без опалубки и надлежащего ухода испытывает воздействие окружающей среды, которое безусловно оказывает влияние на формирование структуры и свойств цементного композита.

Ранее проведенные исследования [1], в ходе которых выполнена серия испытаний с целью изучения степени воздействия окружающей среды на свойства высокопрочных бетонов, позволили сделать следующие выводы:

- испытание высокопрочных бетонов по стандартным методикам (определение прочности, морозостойкости, водонепроницаемости и др.) в возрасте 28 сут нормального твердения является недостаточным, и даже в некоторой степени ошибочным, с точки зрения достоверности оценки их долговечности;
- прекращение ухода за высокопрочным бетоном на начальных этапах твердения в условиях многократно повторяющихся циклов попеременного увлажнения и высушивания приводит к образованию в цементном камне кристаллических агрегатов и сростков со слабыми связями, получению в дальнейшем дефектной структуры, увеличению проницаемости бетона и снижению долговечности конструкции.

Учитывая это, очевидным и логичным решением проблемы является максимально длительный уход за свежееуложенным бетоном, т. е. поддержание температуры и недопущение испарения влаги с поверхности и из толщи конструкции. Однако порой, исходя из условий и сроков строительства, реализация такого варианта не представляется возможной.

Анализ технической литературы и результаты собственных исследований [2, 3] свидетельствуют о том, что одним из способов стабилизации структуры твердеющего бетона и повышения его долговечности, даже в случае прекращения надлежащего ухода за ним в раннем возрасте, может стать введение в смесь фибры армирующих волокон, способных улучшать структуру цементного камня, блокировать микротрещины и приостанавливать их развитие. В результате получаемый композит выдерживает гораздо большие нагрузки и воздействия, чем обычный бетон.

Таким образом, следует ожидать, что армирование высокопрочных бетонов волокнами приведет к демпфированию внутренних напряжений в бетоне при действии механических нагрузок и окружающей среды, улучшит структурные параметры и эксплуатационные характеристики материала.

Цель исследования — оценка эффективности фибрового армирования с точки зрения нейтрализации деструктивных воздействий окружающей среды на твердеющий бетон в раннем возрасте.

В настоящее время для армирования бетона применяют различные металлические и неметаллические волокна — стальные, полимерные, асбестовые, стеклянные, базальтовые и др. [2]. Это позволяет создавать композиты с различными свойствами:

- *высокомодульные волокна*, модуль упругости которых выше модуля упругости тяжелого бетона (обеспечивают повышение прочности и трещиностойкости);
- *низкомодульные волокна* (увеличивают ударную прочность, сопротивление истираемости, сдерживают появление усадочных трещин).

При этом на свойства фибробетона значительное влияние оказывает степень дисперсности армирования, т. е. геометрические характеристики волокон и их объемное содержание в смеси [4].

В рамках настоящего исследования использованы низко- и высоко-модульные полипропиленовые и базальтовые волокна, характеристики которых представлены в *табл. 1*.

Для определения влияния армирующих волокон на свойства цементно-песчаного бетона класса В60 было изготовлено три серии образцов из смесей, составы которых приведены в *табл. 2*.

При выборе армирующих во-

¹ Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях / под ред. Б. А. Крылова, С. А. Амбарцумяна, А. И. Звездава. М.: НИИЖБ, 2005. 275 с.

локон исходили из следующих соображений. Высокомодульные базальтовые волокна обладают значительной прочностью, небольшим относительным удлинением при разрыве, а их развитая поверхность способствует надежному сцеплению с цементным камнем. Кроме того, они характеризуются невысокой стоимостью и экологической безопасностью [5]. Все это позволяет прогнозировать повышенную сопротивляемость бетона, армированного такими волокнами, образование силовых и усадочных трещин, а также сопротивляемость деструктивным воздействиям со стороны окружающей среды в ранние сроки твердения. Следует также помнить, что базальтовая фибра недостаточно стойкая в цементных системах, а с течением времени теряет прочность при взаимодействии с выделяющимися в процессе твердения щелочами в виде $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Для исправления ситуации в состав бетонной смеси вводилась активная пуццолановая добавка — микрокремнезем, которая способствовала снижению количества свободной извести и уменьшению щелочности среды [6], что в определенной степени обеспечило сохранность базальтового волокна в цементном бетоне.

В отличие от базальтовой фибры, полипропиленовые волокна являются низкомодульными и не приводят к существенному улучшению механических характеристик исходного бетона при статическом нагружении. Вместе с тем установлено [7, 8], что введение таких волокон оказывает модифицирующее влияние при формировании структуры цементного камня: уплотняет межпоровые перегородки, увеличивает количество мелких условно-замкнутых пор, повышает воздухо- и водонепроницаемость, морозо- и коррозионную стойкость бетона. При

1. Техническая характеристика Волокон

Показатель	Вид волокна	
	базальтовое	полипропиленовое
Диаметр волокна, мм	0,018	0,022
Длина волокна, мм	12	19
Плотность, г/см ³	2,6	0,9
Прочность при растяжении, МПа	1800	380
Модуль упругости, МПа	90000	4500

2. Расход компонентов для бетонных смесей

Компоненты	Расход компонентов, кг/м ³		
	Состав № 1	Состав № 2	Состав № 3
Цемент ЦЕМ I 42,5Н (производитель — ООО «Петербургцемент»)	648	648	648
Кварцевый песок, фракция 0–2,5 мм	1305	1305	1305
Вода	214	214	214
Суперпластификатор «Макромер П-163»	13	13	13
Микрокремнезем конденсированный МК-85	97	97	97
Базальтовая фибра (производитель — ОАО «Ивотстекло»)	—	13	—
Полипропиленовая фибра Fibrin XT	—	—	3,6

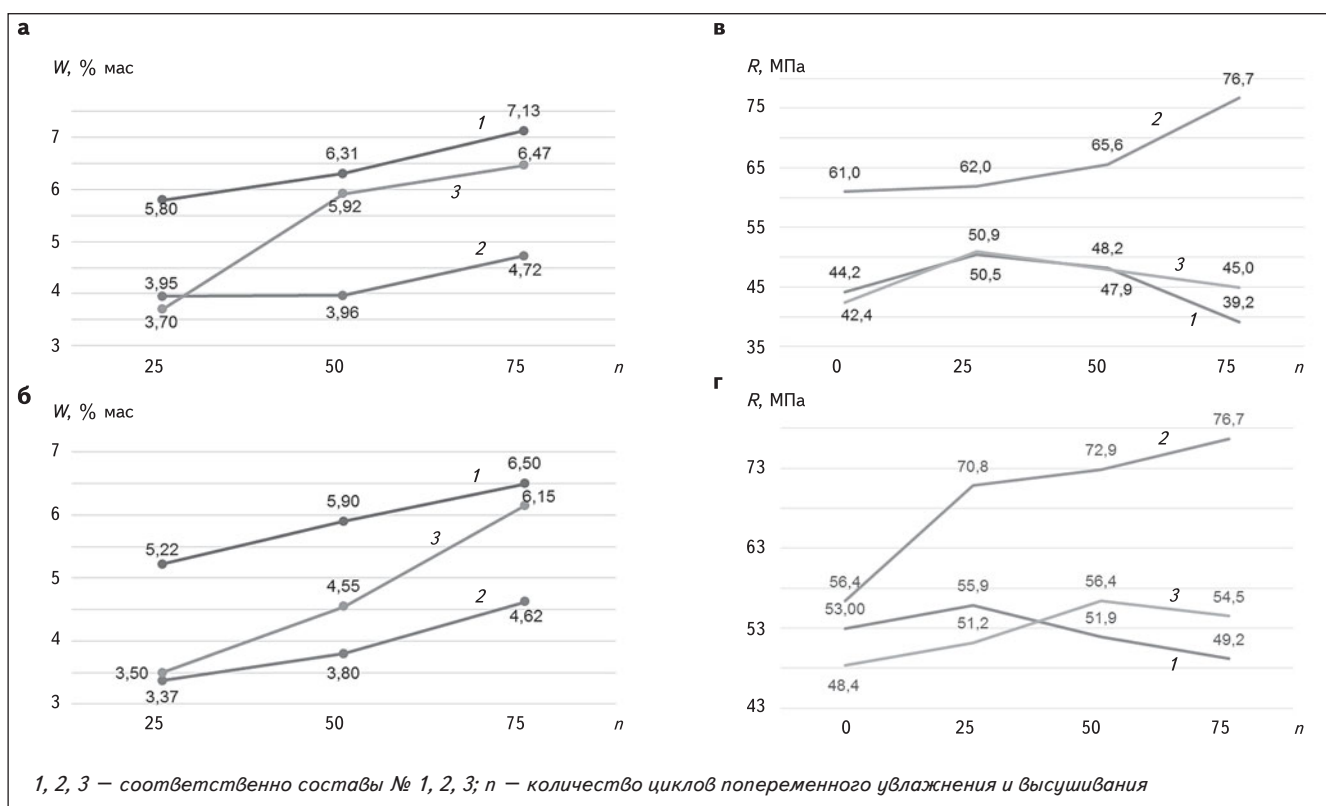
этом полипропиленовая фибра устойчива к различным химическим воздействиям и, в отличие от базальтовой, не подвержена коррозии в щелочной среде.

В рамках настоящего исследования проводились ускоренные испытания бетонных и фибробетонных образцов, имитирующие воздействие окружающей среды на их структуру и свойства в раннем возрасте. Для этого образцы всех трех составов были разделены на выборки, которые подвергались попеременному увлажнению и высушиванию при достижении возраста 3 и 7 сут в условиях нормального твердения. Испытания проводились по методике [9].

Известно, что одно из ключевых условий успешной эксплуатации высокопрочных железобетонных конструкций — получение

и сохранение структуры цементного камня и бетона высокой плотности, способной успешно сопротивляться прониканию агрессивных веществ. В нормальных условиях твердения конструктивные процессы в бетоне способствуют увеличению плотности и прочности структуры, постепенному уменьшению капиллярной пористости и увеличению количества химически связанной воды [10]. Однако при наличии агрессивных воздействий, в частности попеременного высушивания и увлажнения, наблюдается нарушение естественного течения упомянутых процессов, приводящее к деструкции и постепенному снижению плотности бетона, о чем свидетельствуют результаты испытания образцов, представленные на *рисунке*.

Приведенные данные указыва-



Изменение водопоглощения W (а, б) и прочности R (в, г) образцов при попеременном увлажнении и высушивании после трех (а, в) и семи (б, г) суток твердения в нормальных условиях

ют на существенные различия в поведении бетонных и фибробетонных образцов в процессе испытаний. При этом влияние высокомодульных базальтовых волокон на бетон носит ярко выраженный армирующий характер, который проявляется в эффективном сдерживании деструктивных процессов. В результате чего даже после 75 циклов воздействия водопоглощение образцов оказывается ниже, чем у неармированного бетона после 25 циклов.

Полипропиленовые волокна, благодаря высокой степени дисперсности, также способствуют формированию менее проницаемой структуры композита с преимущественно мелкими условно замкнутыми порами. Однако в ходе приложения многократно повторяющихся агрессивных воздействий низко модульные волокна не в состоянии сопротивляться возникающим напряжени-

ям, что в конце концов приводит к водопоглощению, практически равному по величине водопоглощения контрольного бетона.

Аналогичные выводы могут быть сделаны по поводу влияния модуля упругости волокон на изменение прочности бетона в раннем возрасте в процессе многократно повторяющихся температурно-влажностных воздействий.

В отличие от бетона контрольного состава, образцы с базальтовой фиброй приобретают повышенную прочность в результате дисперсного армирования и не снижают, а наоборот, обеспечивают ее рост и после 50–75 циклов воздействий.

Применение низко модульной фибры в меньшей мере способствует сдерживанию процесса образования дефектов, и характер изменения прочности образцов, представленный на рисунке в, г, практически повторяет ре-

зультат, полученный при испытании бетона контрольного состава.

Важнейшим результатом проведенного исследования представляется положение о том, что в случае повторяющихся внешних воздействий, вызывающих деструктивные явления в твердеющем бетоне, только при армировании высокомодульными волокнами может быть достигнута требуемая прочность композита. При этом через 28 сут твердения в нормальных условиях прочность бетона контрольного состава (без волокон) составила 71,4 МПа, при использовании полипропиленовых волокон — 68,3 МПа, высокомодульных базальтовых волокон — 74,3 МПа.

Выводы

1. Проведенные исследования подтверждают выдвинутую гипотезу о возможных отрицательных последствиях преждевре-

менного прекращения ухода за твердеющим высокопрочным бетоном даже при условии приобретения им критической прочности.

2. Введение в состав высокопрочных бетонов неметаллических волокон (фибры), благодаря армирующему и модифицирующему эффекту, позволяет улучшить параметры структуры и увеличить прочность бетона, что предполагает повышение показате-

лей долговечности и эксплуатационной надежности конструкции в целом.

3. Уровень позитивного влияния армирующих волокон в твердеющем высокопрочном бетоне определяется их модулем упругости. Высокомодульные волокна, например базальтовые, эффективно сдерживают деструктивные изменения и позволяют сформировать прочную бездефектную структуру композита

даже при агрессивном воздействии окружающей среды.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министра России в соответствии с Планом фундаментальных научных исследований РААСН 2021 г. (номер государственного учета в Единой государственной информационной системе результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ гражданского назначения – 121032400129-5).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ковалева А. Ю., Ступак М. В., Сидорова А. С. Влияние воздействий окружающей среды на свойства твердеющего высокопрочного бетона // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2(85). С. 120–127. doi 10.23968/1999-5571-2021-18-2-120-127
2. Баженов Ю. М. Технология бетона. М. : Высш. шк., 1987. 415 с.
3. Пухаренко Ю. В. Принципы формирования структуры и прогнозирования прочности фибробетонов // Строительные материалы. 2004. № 10. С. 47–50.
4. Рабинович Ф. Н. Дисперсно армированные бетоны. М. : Стройиздат, 1989. 176 с.
5. Сарайкина К. А., Голубев В. А., Семкова Е. Н. Щелочестойкость базальтового волокна и способы ее повышения // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2012. № 1. С. 185–192.
6. Боровских И. В., Морозов Н. М. Повышение долго-

вечности базальтовой фибры в цементных бетонах // Известия КГАСУ. 2012. № 2(20). С. 160–165.

7. Богданова Е. Р. Экспериментальные исследования бетона, дисперсно армированного синтетической полипропиленовой фиброй // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2015. № 2(43). С. 91–98.
8. Толибова В. И. Полипропиленовая фибра – эффективная армирующая добавка // Сборник материалов XVII Междунар. молодежной науч.-практ. конф. (Новосибирск, 10 марта – 7 апреля). Новосибирск : Центр развития научного сотрудничества, 2017. С. 123–126.
9. Лещинский М. Ю. Испытание бетона. М. : Стройиздат, 1980. 360 с.
10. Усов Б. А., Окольников Г. Э. Управление формированием структуры и долговечностью модифицированного бетона при положительных и отрицательных температурах // Системные технологии. 2016. № 18. С. 54–63.

REFERENCES

1. Kovaleva A. Yu., Stupak M. V., Sidorova A. S. Impact of environmental load on the properties of hardening high-strength concrete. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2021, no. 2(85), pp. 120–127. (In Russ.). doi 10.23968/1999-5571-2021-18-2-120-127
2. Bazhenov Yu. M. *Tekhnologiya betona* [Concrete Technology]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1987. 415 p. (In Russ.).
3. Pukharenko Yu. V. Structure formation principles and stability forecasting for fibre concrete. *Stroitel'nye materialy*, 2004, no. 10, pp. 47–50. (In Russ.).
4. Rabinovich F. N. *Dispersno armirovannyye betony* [Dispersed reinforced concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1989. 176 p. (In Russ.).
5. Saraykina K. A., Golubev V. A., Semkova E. N. Basalt fiber alkali-resistance and methods of its increase. *Vestnik PNIPIU. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2012, no. 1, pp. 185–192. (In Russ.).
6. Borovskikh I. V., Morozov N. M. Increase of durability of basalt fiber cement concretes. *Izvestiya KGASU*, 2012, no. 2(20), pp. 160–165. (In Russ.).

7. Bogdanova E. R. Experimental study of concrete, reinforced by dispersion of synthetic polypropylene fibers. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya*, 2015, no. 2(43), pp. 91–98. (In Russ.).
8. Tolibova V. I. Polypropylene fiber – an effective reinforcing additive. *Sbornik materialov XVII Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Collection of materials of the XVII International Youth Scientific and Practical Conference (Novosibirsk, March 10 – April 7)]. Novosibirsk, Centr razvitiya nauchnogo sotrudnichestva Publ., 2017, pp. 123–126. (In Russ.).
9. Leshchinskiy M. Yu. *Ispytanie betona* [Concrete testing]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980. 360 p. (In Russ.).
10. Usov B. A., Okol'nikova G. E. Control of structure formation and durability of modified concrete at positive and negative temperatures. *Sistemnye tekhnologii*, 2016, no. 18, pp. 54–63. (In Russ.). ■

УДК 624.139:624.154

doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.14-23

Теплотехническое влияние фундамента на глубину промерзания и оттаивания грунтов

Андрей Владимирович БОЯРИНЦЕВ, аспирант, andrey_boyarintsev@mail.ru**Сергей Владимирович ЛАНЬКО**, кандидат технических наук, доцент, sergeylanko@gmail.com**Александра Владимировна ЗЫБЦЕВА**, магистрант, hohckuf@gmail.comСанкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ),
190005 Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

Аннотация. Сезоннопромерзающие и многолетнемерзлые грунты распространены на территории разных стран. Их изучению посвящено множество работ как российских, так и зарубежных исследователей. В некоторых из них рассмотрены процессы теплообмена в грунтах вокруг охлаждающих устройств или теплотехнических барьеров. Анализируя эти публикации, а также отечественные нормативные документы, можно отметить влияние фундаментов на распределение температуры в окружающем их массиве грунта. При этом литературные источники и нормативные документы не отражают весь процесс в полной мере, так как в них не учитывается тип фундамента, теплотехнические свойства его материалов и размеры в случае с промерзанием. Кроме того, не до конца понятным остается и набор факторов, влияющих на размеры образующейся у фундамента воронки из промерзшего или оттаявшего грунта. Для более подробного изучения этого процесса было проведено данное исследование. Выделив восемь факторов, предположительно влияющих на образование и размеры указанной воронки, последовательно, методом конечных разностей, решалось множество задач, в каждой из которых изменялся только один фактор. Результаты показали влияние фундаментов на температуру грунтов. Были определены основные факторы, влияющие на размеры воронки вокруг фундамента. Установлены зависимости размеров воронки от различных факторов. На их основе даны рекомендации по проектированию фундаментов в условиях сезонного промерзания и оттаивания грунтов.

Ключевые слова: промерзание и оттаивание грунтов, морозное пучение грунтов, мерзлые грунты, свайные фундаменты, композитные сваи

Для цитирования: Бояринцев А. В., Ланько С. В., Зыбцева А. В. Теплотехническое влияние фундамента на глубину промерзания и оттаивания грунтов // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 5. С. 14–23. doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.14-23

THE THERMAL ENGINEERING INFLUENCE OF THE FOUNDATION ON THE DEPTH OF FREEZING AND THAWING OF SOILS

Andrey V. BOYARINTSEV, andrey_boyarintsev@mail.ru**Sergei V. LANKO**, sergeylanko@gmail.com**Aleksandra V. ZYBTSEVA**, hohckuf@gmail.comSaint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-ya Krasnoarmeyskaya ul., 4,
St. Petersburg 190005, Russian Federation

Abstract. Seasonally freezing and permafrost soils are spread on the territory of any countries. Many works, both Russian and foreign researchers, have been devoted to their study. Some of them consider the processes of heat exchange in soils around cooling devices or thermal barriers. Analyzing these publications, as well as domestic regulatory documents, it is possible to note the influence of foundations on the temperature distribution in the surrounding soil mass. At the same time, literary sources and regulatory documents do not fully reflect this whole process, since the type of foundation, thermal properties of its materials and dimensions in the case of freezing are not taken into account. Also, a set of factors affecting the size of the funnel formed at the foundation from frozen or thawed soil remains not fully understood. For a more detailed study of this process, this study was conducted. Having identified eight factors presumably influencing the formation and size of the specified funnel, many problems were solved sequentially by the finite difference method, in each of which only one factor changed. The results demonstrated the influence of foundations on soil temperature. The main factors influencing the size of the funnel around the foundation were identified. Dependences of funnel sizes on different factors have been established. Based on them, recommendations are given for the design of foundations in conditions of seasonal freezing and thawing of soils.

Keywords: freeze-and-thaw of soils, soil frost heaving, frozen soils, pile foundations, composite piles

For citation: Boyarintsev A. V., Lanko S. V., Zybtsava A. V. The Thermal Engineering Influence of the Foundation on the Depth of Freezing and Thawing of Soils. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2022, no. 5, pp. 14–23. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.14-23

Введение и постановка проблемы

Значительную территорию России занимают сезоннопромерзающие, многолетнемерзлые (ММГ) и сезоннооттаивающие грунты. Они обладают характерными свойствами, которые отличают их от обычных грунтов. Часть этих особенностей связана с переходом температуры грунта через температуру фазовых переходов T_{bf} . Это сопровождается такими процессами, как морозное пучение грунтов, или термокарстовые образования. Их игнорирование и неверный учет способствуют развитию неравномерных деформаций зданий, подъему или осадке соответственно в процессе пучения грунтов, а также оттаивания ММГ.

Согласно отечественным нормативным документам СП 22.13330.2016 «СНиП 2.02.01-83* Основания зданий и сооружений» (с изм. № 1–3) и СП 25.13330.2012 «СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечноммерзлых грунтах» (с изм. № 1–4), расчетная глубина промерзания и оттаивания определяется как произведение нормативного значения мощности деятельного слоя на коэффициенты k_h и k'_h соответственно. Значение данных коэффициентов зависит главным образом от конструктивных особенностей здания. В случае с промерзанием, если фундамент расположен у отапливаемого подвала, то коэффициент принимает значение меньше 1, что означает уменьшение глубины у фундамента за счет теплового воздействия подвала. При расположении фундамента вне здания коэффициент равен 1,1 (п. 5.5.4 СП 22.13330). Таким образом, при отсутствии отепляющего воздействия сам фундамент способствует увеличению глубины промерзания на 10 %. При этом норматив не оговаривает параметры, которые могут

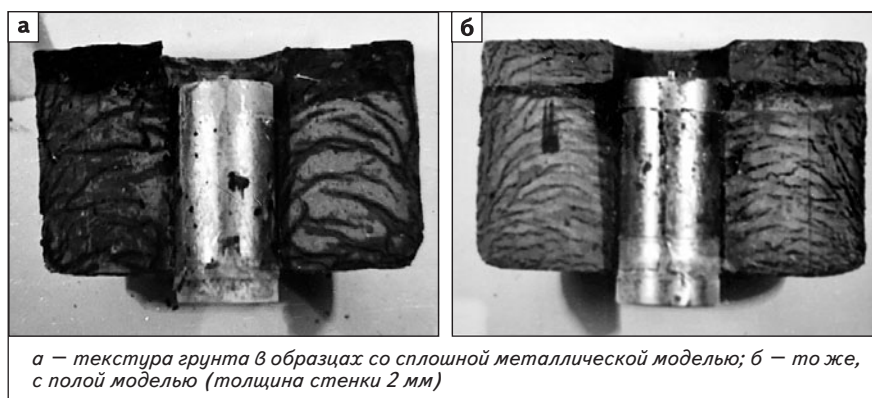


Рис. 1. Исследования В. М. Соколова [1]

1. Теплотехнические характеристики грунтов, используемых в исследовании

Тип грунта. Задача	Теплопроводность, Вт/(м·К)		Объемная теплоемкость МДж/(м ³ ·К)		Теплота фазовых превращений, МДж/м ³	Температура замерзания, °С
	талого	мерзлого	талого	мерзлого		
1. Промерзание	1,338	1,513	2,8	2,14	44,75	-1,8
2. Оттаивание	1,74	1,95	2,84	2,15	97,98	-0,5

влиять на значение данного коэффициента.

Анализируя табл. Г2 СП 25.13330, можно выделить факторы, которые влияют на расчетную глубину оттаивания, — размеры фундамента, а также условия теплообмена между грунтом и атмосферой. Так, значение коэффициента k'_h варьируется от 0,8 до 1,5.

В процессе изучения прочности смерзания моделей свай с мерзлыми грунтами В. М. Соколов [1] наблюдал искривление линз льда у металлической модели сваи, а также у стен металлического лотка, в котором проводился эксперимент (рис. 1). В опытах применялись различные типы моделей: сплошная и полая стальные, а также бетонная. Сравнивая между собой текстуру мерзлого грунта после испытаний, можно отметить различие в структуре грунта моделей: крупные трещины, заполненные льдом, вокруг сплошной стальной модели (рис. 1а) и большое количество трещин меньшего размера вокруг полой

стальной модели (рис. 1б). Это позволяет сделать вывод о влиянии теплопроводности модели на распределение температуры грунта вокруг нее.

Подобный эффект встречается и в работе Д. Г. Цвигунова [2]. Автор сопоставил распределение влажности грунта после его промерзания вокруг двух железобетонных опор контактной сети, одна из которых была утеплена над поверхностью земли. Как показали результаты расчета, влажность грунта вокруг утепленной сваи оказалась меньше влажности грунта вокруг неутепленной сваи. Это свидетельствует о влиянии теплопроводности сваи на распределение температуры в грунтовом массиве. Однако подобного вывода сделано не было.

Таким образом, становится понятным, что изменение глубины промерзания или оттаивания у фундаментов — сложный процесс, на который влияет множество факторов. При этом в современных нормах весь этот про-

2. Матрица эксперимента

№ задачи	Теплотехнические факторы		Конструктивные факторы				Климатические факторы		Тип грунта							
	теплопроводность ¹ , Вт/(м·К)	теплоемкость ² , МДж/(м ³ ·К)	тип фундамента	диаметр, м	длина, м	высота над землей, м	температура воздуха ³ , °С	коэффициент теплопередачи ⁴								
<i>Моделирование процесса промерзания грунта</i>																
1	0,2, 1,3, 1,5, 2, 2,5, 5, 7,5, 15, 25	3,7	Свая, лента	0,4	10	1	Чита	4	1							
2	25	1,6, 3,7	Свая													
3	0,2, 25	3,7								0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,2	3,5, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12	1	Чита	4		
4															-5, -10, -15	
5																0, 0,25, 0,5, 0,75, 1, 1,25
6																
7	0,4	3,5, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12								1	Чита	4				
<i>Моделирование процесса оттаивания ММГ (в твердомерзлом состоянии)</i>																
8	0,2, 1,3, 1,5, 2, 2,5, 5, 7,5, 15, 25	3,7	Свая, лента	0,4	10	1	Якутск	25	2							
9	25	3,7, 1,7	Свая													
10	0,2, 25	3,7								0,2, 0,4, 0,6	2, 3, 5, 8, 10, 13	1	Якутск	25		
11															5, 15, 25	
12																0, 0,25, 0,5, 0,75, 1, 1,25
13																
14	0,4	2, 3, 5, 8, 10, 13								1	Якутск	25				

Примечания:

¹ Значения теплопроводности принимали для основных конструкционных материалов: 0,25 — стеклопластик [3], 1,5 — бетон, 25 — сталь, а также промежуточные значения.

² Значения теплоемкости принимались для бетона и стали.

³ Температура задавалась переменной, с изменением значения ежемесячно. Среднемесячную температуру определяли согласно метеорологическим данным по СП 131.13330.2012 «СНиП 23-01-99* Строительная климатология» для Читы и Якутска. Для задач 4 и 11 принимали соответственно среднезимнюю и среднелетнюю температуру. Повышение температуры воздуха у поверхности грунта не учитывалось, поскольку его влияние на распределение температуры в грунте незначительно [4].

⁴ Коэффициент теплоотдачи моделирует снежный покров зимой и растительный летом. Значения коэффициента рассчитывали для снежных покровов толщиной 0,1, 0,15, 0,3, 0,6, 1, 1,5, 2, 2,5 м. Для растительного покрова значения коэффициента устанавливали согласно [4] (минимальное, среднее и максимальное).

цесс не отражен в полной мере. Не учитывается тип фундамента, теплотехнические свойства его материалов и размеры в случае с промерзанием. Также не до конца понятны факторы, влияющие на размеры образующейся во-

ронки, в том числе и горизонтальные (так называемый радиус воронки).

Цель данного исследования состоит в определении причины образования подобной воронки, описании ее характера, а также

установлении ряда факторов, влияющих на ее размеры.

Метод исследования

Использован метод численного моделирования процесса промерзания и оттаивания грунтово-

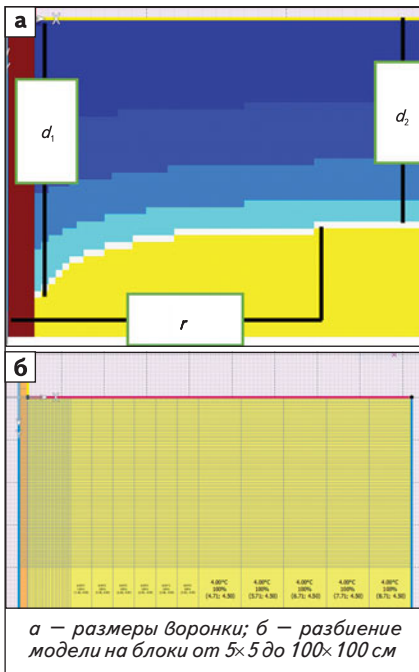


Рис. 2. Построенная численная модель

го массива с погруженной в него сплошной одиночной сваи круглого сечения. Расчеты производились в программном комплексе, реализующем конечно-разностный метод определения температуры каждой точки расчетной модели, с учетом изменения температуры воздуха в годовом цикле, условий теплопередачи между грунтом и атмосферой, а также переходов грунта из талого состояния в мерзлое и обратно.

Первоначально были выделены факторы, влияющие на формирование воронки. К ним относятся: теплопроводность, теплоемкость, теплопередача, температура воздуха, тип фундамента, размеры (диаметр и длина сваи), высота его над землей. Для установления степени влияния каждого фактора решали ряд задач. В каждой из них последовательно менялся только один фактор. Задача решалась моделированием процесса промерзания и оттаивания с фиксацией следующих параметров воронки (рис. 2а):

- k — коэффициент, равный отношению глубин промерзания/

оттаивания грунта у сваи и вдали от нее, $k = d_1/d_2$;

- δ — высота воронки, т. е. разность между глубинами промерзания/оттаивания грунта у сваи и вдали от нее, $\delta = d_1 - d_2$;
- r — радиус воронки, м.

Теплотехнические характеристики глинистых грунтов, моделируемых в исследовании, приведены в табл. 1.

Матрица проведенного численного эксперимента дана в табл. 2.

Численная модель собиралась в программном комплексе Qfrost и представляла собой массив грунта, размеры которого (ширина — 9 м, глубина — 13 м) назначали из условия недопущения их влияния на размеры воронки. Разбиение модели на сетку конечных элементов приведено на рис. 2б. Для получения более точных размеров воронки в предполагаемом месте ее формирования ячейки сетки задавались небольшого размера (5×5 см). Для сокращения числа блоков их размеры увеличивались при удалении от сваи. Укрупнение производилось таким образом, чтобы каждый угол каждого конечного элемента приходил в углы всех окружающих.

К поверхностям модели грунта прикладывались граничные условия (далее — ГУ) с учетом рекомендаций [5]: к верхней — ГУ третьего рода с задаваемыми значениями температуры и коэффициента теплопередачи в каждой задаче согласно табл. 2; к боковым — ГУ второго рода с нулевым значением теплотока; к нижней — ГУ первого рода с постоянным значением, равным начальной температуре грунта; к надземной части сваи — ГУ первого рода с переменным значением температуры. В левой части области моделировалась свая переменного диаметра и длины. Свая задавалась как грунт, с теплотехническими характеристика-

ми исследуемого материала фундамента и температурой фазового перехода, равной -100 °С, что в условиях решаемых задач невозможно. Таким образом исключались тепловыделения при переходе температуры сваи через ноль. Задачи, в которых моделировалась свая, решались как осесимметричные, с осью симметрии, проходящей через центр сваи. При моделировании ленточного фундамента рассматривалась плоская задача.

Проверку адекватности расчетной модели выполняли согласно [6]. Результаты расчета даны в табл. 3.

Учитывая отсутствие данных о ГУ [6] и принятые размеры ячеек сетки конечных элементов у фундамента (5 см), результаты сравнительного расчета позволяют судить об адекватности используемой модели и достаточности ее для применения в исследовании.

Результаты исследования и их анализ

Результаты решения задач 1 и 8 представлены на рис. 3. Анализируя характер поведения зависимости отношения k от теплопроводности материала сваи $\lambda_{св}$ на конец каждого месяца как при промерзании грунта (рис. 3а), так и при его оттаивании (рис. 3б), можно заметить, что воронка начинает формироваться при выполнении условия $\lambda_{св} > \lambda_{гр}$ (рис. 3в). Далее, с ростом значения $\lambda_{св}$ увеличивается и размер воронки.

Изотермы грунта на 1 декабря при его промерзании вокруг разных типов фундамента различной теплопроводности представлены на рис. 4. Сравнивая полученные распределения, становится очевидным изменение высоты воронки при изменении типа фундамента и его материала.

При сравнении динамики изменения высоты воронки (разность δ) во времени (рис. 5а, б)

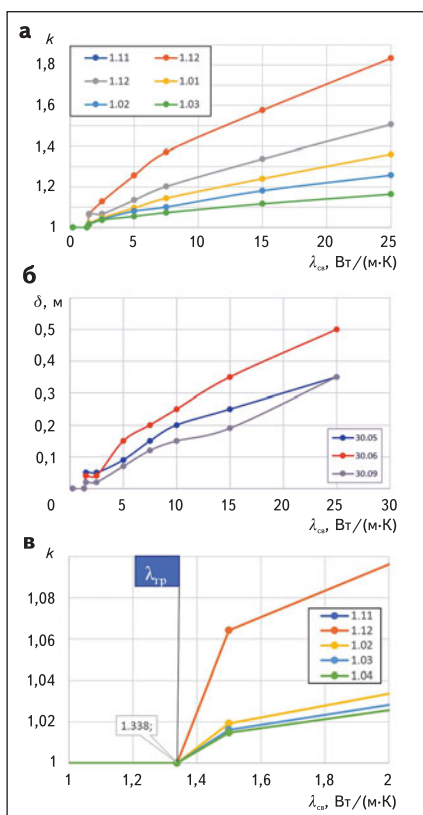


Рис. 3. Графики зависимости размеров воронки от теплопроводности при промерзании (а), оттаивании ММГ (б), в момент возникновения воронки (в)

с абсолютными значениями температуры воздуха (рис. 5б, г) можно заметить их взаимосвязь. Так, при изменении абсолютного значения температуры воздуха в ту же сторону изменяется и высота воронки, а при отсутствии изменения температуры воздуха размеры воронки имеют незначительные изменения (рис 5д).

Таким образом, наибольшая высота воронки и соответственно наибольшее искривление фронта промерзания отмечаются в период максимальных абсолютных значений температуры воздуха, когда в случае с промерзанием происходит наиболее интенсивное пучение грунтов [7].

Анализируя зависимость высоты воронки от теплоемкости материала, можно заметить, что данный фактор оказывает минимальное влияние (рис. 6).

С понижением значения коэф-

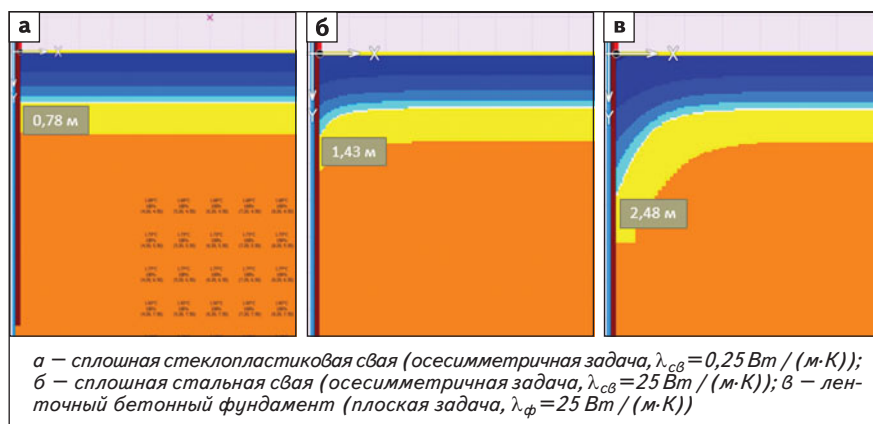


Рис. 4. Распределение температуры грунта у разных фундаментов

3. Проверка адекватности используемой модели

Расчет	Глубина оттаивания, м
Данные по [6]:	
СП 25.13330 по данным натуральных наблюдений	1,62
ПК Frost 3D Universal	1,6
ПК, используемый в исследовании	1,55

П р и м е ч а н и е. При составлении расчетной модели использовались данные, указанные в статье [6]: средняя температура каждого месяца, теплотехнические характеристики грунтов, их начальная температура. Ввиду отсутствия данных по назначенным ГУ были приняты: боковые – второго рода, верхние – первого рода (с переменной температурой каждого месяца), нижние – первого рода (с постоянной температурой -3°C).

фициента теплопередачи α , который моделирует повышение снежного покрова зимой или же густоту растительного покрова летом, степень влияния сваи на распределение температуры в грунте повышается, что видно по графику зависимости отношения k от высоты снежного покрова (рис. 7а). Физический смысл достижения графиком асимптоты – образование воронки из промерзшего/оттаявшего грунта при отсутствии промерзания вдали от сваи (рис. 7б).

Рассматривая значение коэффициента α в диапазоне значений, соответствующих снежному или растительному покровам (рис. 7в, г), можно сделать вывод о линейной зависимости. Гиперболическое очертание графика характерно для случаев использования вдоль здания теплотехнических барьеров, обладаю-

щих низкими параметрами теплопередачи.

Представленные выводы справедливы для случая, в котором выполняется условие $\lambda_{св} > \lambda_{гр}$. При $\lambda_{св} < \lambda_{гр}$ данной зависимости нет.

Как показал анализ влияния среднезимней температуры на высоту воронки (рис. 8), с повышением абсолютного значения температуры увеличивается и высота воронки, что подтверждает сделанные ранее выводы. При $\lambda_{св} < \lambda_{гр}$ данной зависимости нет.

Результаты расчета задач 5 и 12 свидетельствуют об отсутствии влияния высоты подъема сваи над землей на размеры воронки. Однако данный результат мог быть получен вследствие несовершенства расчетной модели, поскольку в ней не учитывается обдувание поверхности сваи ветром и ее нагрев от солнечной радиации.

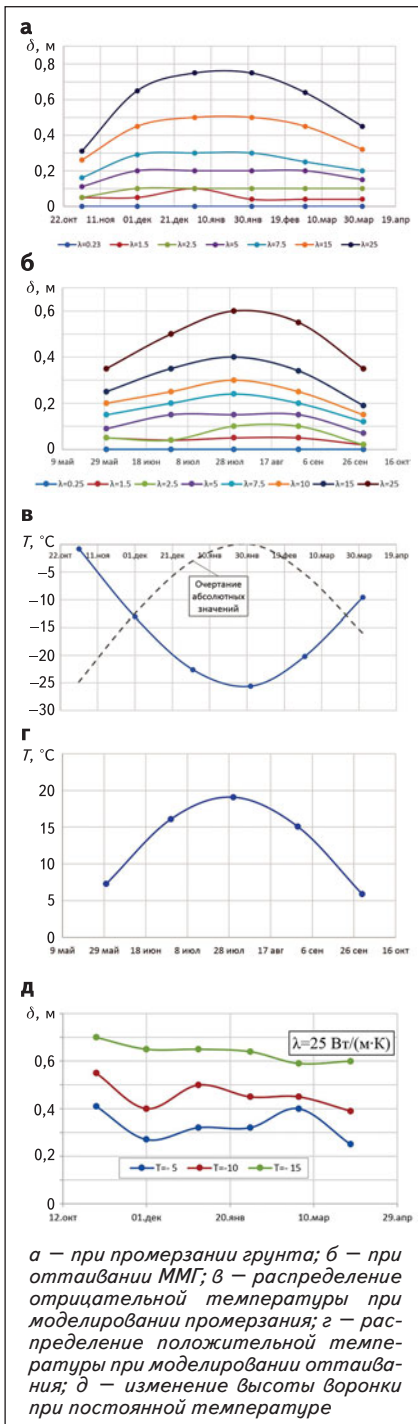


Рис. 5. Результаты анализа развития высоты воронки во времени

Следует отметить, что на основе полученных ранее зависимостей воздействием солнечной радиации и обдуванием поверхности свай с теплопроводностью ниже теплопроводности грунта можно пренебречь (рис. 9).

Еще один важный фактор, влияющий на формирование воронки, — диаметр сваи. Так, с увеличением диаметра сваи увеличивается как высота воронки (рис. 10), так и ее радиус. При $\lambda_{св} < \lambda_{гр}$ данной зависимости также нет.

4. Некоторые результаты расчета глубины промерзания

Дата	Глубина промерзания, м		Отношение k	Разность δ , м	Длина сваи к ее общей длине ¹ , %
	около сваи	вдали			
<i>Длина сваи² (3,5 + 1) м</i>					
1.11	0,38	0,07	5,43	0,31	10
1.12	1,43	0,78	1,83	0,65	39
1.01	2,27	1,48	1,53	0,79	61³
1.02	2,88	2,08	1,41	0,85	78
1.03	3,33	2,48	1,36	0,9	90
1.04	3,5	2,73	1,3	0,82	95
<i>Длина сваи² (5 + 1) м</i>					
1.11	0,38	0,07	5,43	0,31	8
1.12	1,43	0,78	1,83	0,65	29
1.01	2,23	1,48	1,51	0,75	45
1.02	2,83	2,08	1,36	0,75	57
1.03	3,18	2,48	1,28	0,7	64
1.04	3,25	2,73	1,19	0,52	65
<i>Длина сваи² (9 + 1) м</i>					
1.11	0,38	0,07	5,43	0,31	4
1.12	1,43	0,78	1,83	0,65	16
1.01	2,23	1,48	1,51	0,75	25
1.02	2,83	2,08	1,36	0,75	31
1.03	3,12	2,48	1,26	0,64	35
1.04	3,23	2,73	1,18	0,5	36
<i>Длина сваи² (10 + 1) м</i>					
1.11	0,38	0,07	5,43	0,31	3,8
1.12	1,43	0,78	1,83	0,65	14
1.01	2,23	1,48	1,51	0,75	22
1.02	2,83	2,08	1,36	0,75	28
1.03	3,12	2,48	1,26	0,64	31
1.04	3,23	2,73	1,18	0,5	31

Примечания: ¹ Соотношение длины сваи, находящейся в слое сезонномерзлого грунта, к общей длине сваи, погруженной в грунт, %.

² Длина сваи: первое слагаемое обозначает длину участка сваи, погруженного в грунт, второе — возвышающегося над грунтом.

³ Выделенные значения превышают значения, полученные при расчете сваи длиной 9 м.

Изучая влияние длины сваи (рис. 11), можно сделать вывод о том, что в теплообмен могут включаться слои грунта, расположенные ниже деятельного слоя. Оказывая дополнительное

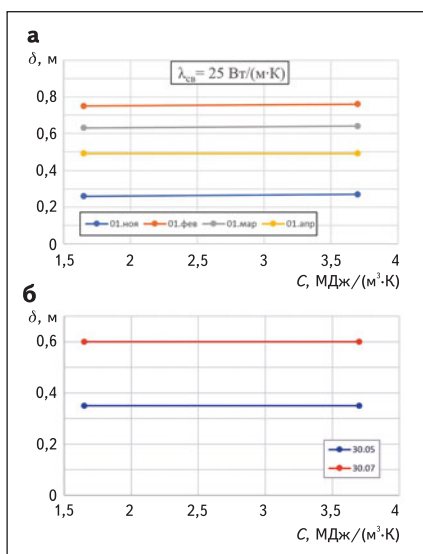


Рис. 6. Графики зависимости высоты воронки от теплоемкости материала C при промерзании грунта (а) и оттаивании ММГ (б)

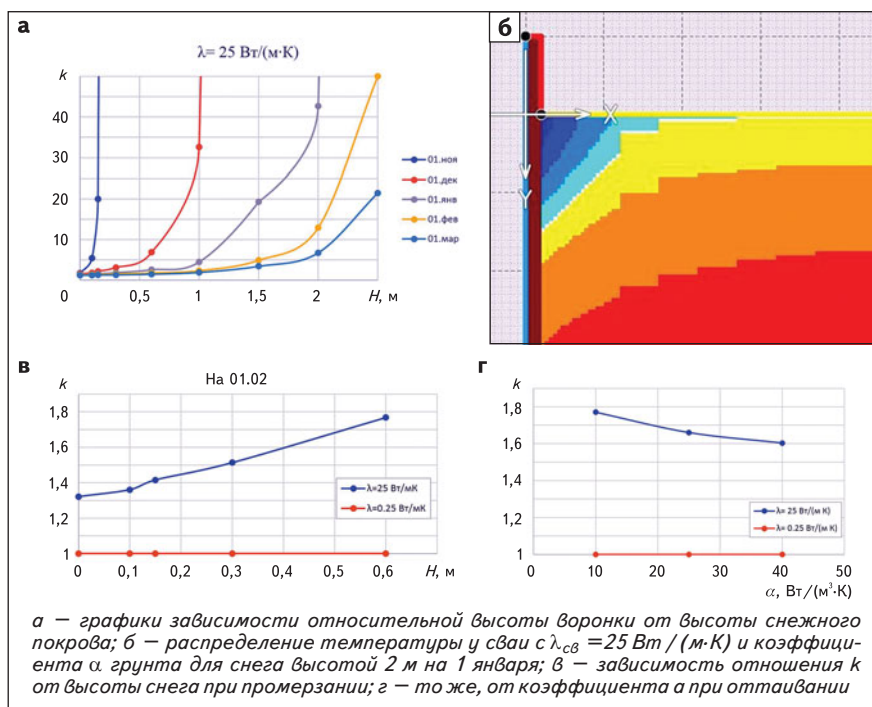


Рис. 7. Влияние теплопередачи. Результаты решения задач 3 и 10

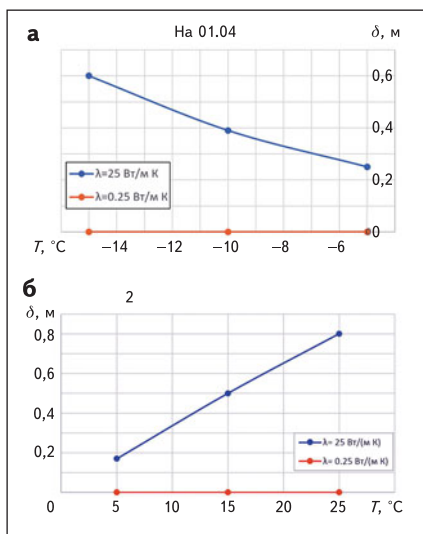


Рис. 8. Графики зависимости высоты воронки от температуры T при промерзании грунта (а) и оттаивании ММГ (б)

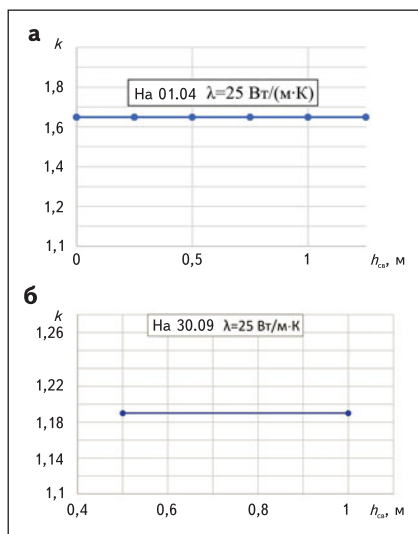


Рис. 9. Графики зависимости отношения k от высоты подъема сваи над грунтом при промерзании грунта (а) и оттаивании ММГ (б)

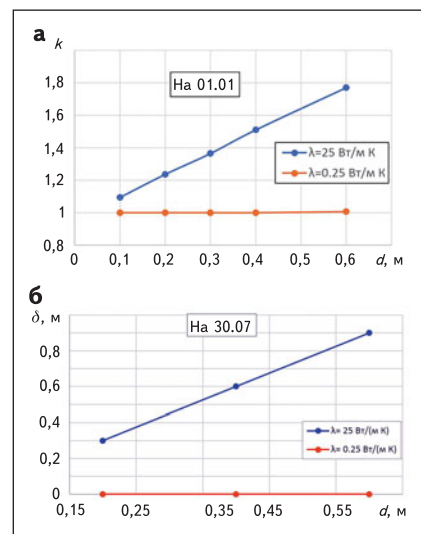


Рис. 10. Графики зависимости высоты воронки от диаметра сваи при промерзании грунта (а) и оттаивании ММГ (б)

тепловое воздействие на сваю, они препятствуют развитию воронки из мерзлого или талого грунта. Данный эффект виден по выравниванию графика зависимости отношения k от длины сваи l . Также следует подчеркнуть, что при отсутствии отмеченного противодействия возможно понижение фронта промерзания

ниже пяти сваи или подошвы фундамента мелкого заложения (рис. 11б, в). В случае использования теплопроводящих материалов сваи с $\lambda_{св} < \lambda_{гр}$ отмечается горизонтальное положение границы деятельного слоя при любой длине фундамента (рис. 11б, е).

Результаты расчета глубины

промерзания около сваи различной длины представлены в табл. 4. Анализируя ее, можно заключить, что для наиболее эффективного противодействия распространению воронки необходимо, чтобы не менее 40 % сваи находилось в слоях грунта, расположенных ниже деятельного слоя. При

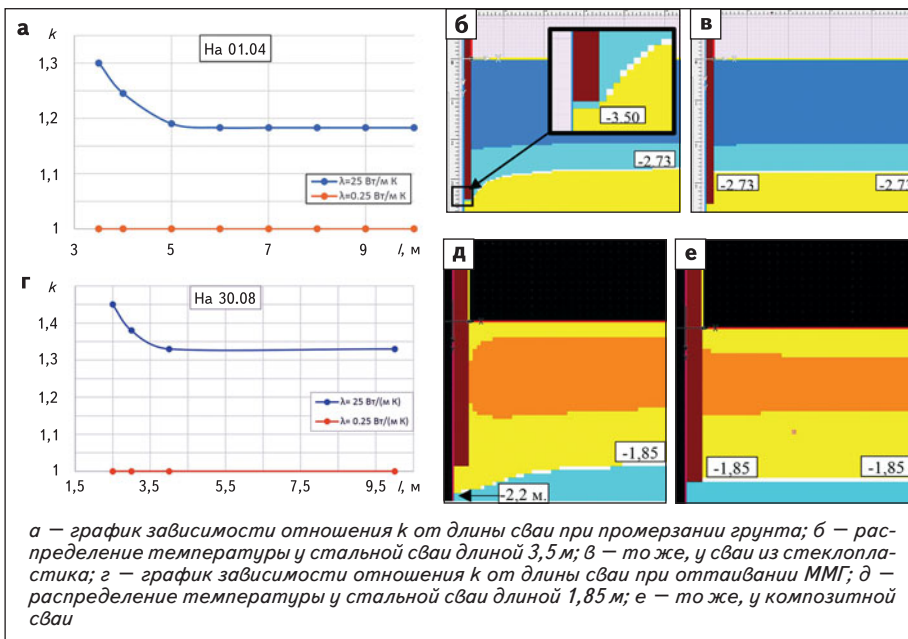


Рис. 11. Влияние длины сваи. Результаты решения задач 7 и 14

$\lambda_{св} < \lambda_{гр}$ данной зависимости также нет.

Аналогично рис. 3в, по графику зависимости r от теплопроводности, можно сделать вывод о том, что воронка образуется при выполнении условия $\lambda_{св} > \lambda_{гр}$ (рис. 12а, б). При анализе изменения радиуса воронки во времени, можно сказать, что она увеличивается линейно (рис. 12в). Кроме того, на радиус оказывает влияние диаметр сваи: чем больше диаметр сваи, тем больше и радиус воронки (рис. 12б). Как показало исследование на конец зимнего периода радиус воронки имеет значение от 9 до 12 диаметров сваи. Различие в значениях воронки может быть объяснено увеличением размеров ячеек сетки конечных элементов вдали от сваи, что повышает погрешность расчета.

Обсуждение результатов

Исследование влияния каждого из факторов показало, что воронка образуется в том случае если теплопроводность материала фундамента выше теплопроводности окружающего его грунта. К факторам, влияющим на

размеры воронки, можно отнести: тип фундамента, теплопроводность его материала, размеры поперечного сечения, длину, температуру воздуха, а также параметры теплообмена на границе атмосфера–грунт. Теплоемкость входит в число факторов, влияние которых незначительно или отсутствует вовсе. Влияние высоты подъема сваи над землей в данном исследовании раскрыто не в полной мере, поскольку в созданной модели не учтено обдувание сваи ветром, а также тепловое воздействие солнечной радиации, что будет рассмотрено в дальнейшей работе.

Промерзание грунтов сопровождается рядом процессов, таких как: миграция влаги, увеличение объема воды при переходе из жидкого состояния в твердое, воздействие пучащегося грунта на подземные конструкции и др. Соответственно, интенсификация промерзания грунтов у сваи, проявляющаяся образованием рассматриваемой воронки деятельного слоя, оказывает влияние на отмеченные процессы.

Миграция влаги, как известно, зависит от скорости промерза-

ния грунта. Существует оптимальное значение скорости промерзания, при котором значение миграционного потока максимально. Согласно [8, 9] оптимальное значение скорости промерзания находится в диапазоне 0,6–1 мм/ч. При значениях 0–0,04 и свыше 8 мм/ч миграционный поток отсутствует. Исследования [10] показывают, что для различных грунтов оптимальная скорость промерзания разная и находится в диапазоне 1,8–3,6 мм/ч.

Результаты расчета задачи 1 для сваи стальной с $\lambda_{св} = 25$ Вт/(м·К) и стеклопластиковой с $\lambda_{св} = 0,25$ Вт/(м·К) показывают, что на конец зимнего периода глубина промерзания у стальной сваи составляет 3,18 м. Это соответствует средней за зиму скорости промерзания, равной 0,73 мм/ч. У стеклопластиковой сваи глубина промерзания – 2,73 м, скорость промерзания – 0,63 мм/ч, что меньше на 15 %. Выполняя подобный анализ по месяцам, следует отметить, что в наиболее холодный период года разница в скоростях промерзания может достигать 33 %.

Скорость промерзания грунта у стальных свай выше, чем у стеклопластиковых, но меньше, чем оптимальное значение. Это означает, что в данном случае к стальной свае будет мигрировать большее количество влаги, чем к стеклопластиковой. Кроме скорости промерзания, на миграцию влаги будет действовать искривление фронта промерзания: направление миграции влаги будет направлено перпендикулярно фронту. Таким образом, при промерзании грунта в контактной зоне фундамент–грунт будет концентрироваться влага, которая способствует увеличению сил морозного пучения.

Как показывают лабораторные исследования [11] и полевые

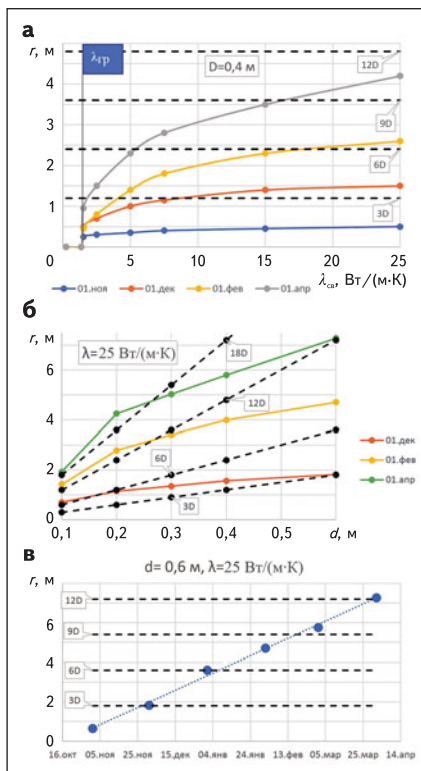


Рис. 12. Графики зависимости радиуса воронки r при промерзании грунта от теплопроводности материала сваи (а), диаметра сваи (б), изменения во времени (в)

наблюдения [12, 13], линия действия сил морозного пучения будет также направлена по нормали к фронту промерзания (см. рис. 1). Следовательно, при искривлении фронта промерзания в контактной зоне сваи и грунта, помимо касательной, возникает еще и нормальное воздействие пучения на сваю. Это сказывается на напряженно-деформированном состоянии (НДС) промерзающего грунта, повышает прочность его смерзания с фундаментом и, как следствие, повышает силы морозного пучения.

При оттаивании талая вода совместно с инфильтрационными осадками в летний и осенний пе-

риоды может скапливаться в образуемой воронке и вызывать более интенсивное оттаивание грунтов, способных к фильтрации воды.

Интенсивность описанных явлений во многом будет зависеть от кривизны воронки. Как было установлено в исследовании, размеры воронки одновременно зависят от нескольких факторов, что делает достаточно проблематичным их аналитическое определение. Кроме того, достоверно установить степень влияния миграции влаги и изменения НДС грунтов довольно трудная задача даже при использовании численных методов расчета. Итак, для исключения формирования воронки и сопутствующих явлений, вызванных ее образованием, рекомендуется использовать конструкции фундаментов, теплопроводность которых ниже теплопроводности окружающего их грунта.

Выводы

1. В процессе промерзания или оттаивания грунта вокруг фундамента мощность деятельного слоя у фундамента может быть больше, чем вдали от него, формируя таким образом воронку, образование которой происходит в том случае, если теплопроводность материала фундамента выше теплопроводности грунта, вмещающего его. Следовательно, для исключения возникновения воронки деятельного слоя и всех сопутствующих ее появлению процессов рекомендуется использовать фундаменты, теплопроводность которых ниже теп-

лопроводности грунта, например полимерные сваи.

2. К факторам, влияющим на высоту и радиус воронки, можно отнести: тип фундамента, теплопроводность его материала, размеры поперечного сечения, длину, температуру воздуха, а также параметры теплообмена на границе атмосфера–грунт. Теплоемкость – в числе факторов, влияние которых незначительно или отсутствует вовсе.

3. При использовании материала со значением теплопроводности выше теплопроводности грунта, для уменьшения величины воронки необходимо назначать такую отметку заложения пяты сваи, чтобы не меньше 40 % ее длины находилось в слоях грунта, расположенных ниже деятельного слоя.

4. Радиус образуемой воронки может превышать минимальное нормативное расстояние между забивными сваями, равное трем диаметрам, и достигать 12 диаметров, что необходимо учитывать при использовании свай из теплопроводящих материалов в свайных полях, или кустах.

Уточнение полученных зависимостей лабораторными и полевыми экспериментами, а также разработка аналитической методики определения расчетной глубины промерзания и оттаивания, учитывающей все установленные в данном исследовании факторы, станет следующим этапом работы авторов данной статьи.

Работа выполнена при поддержке научно-образовательного центра мирового уровня «Российская Арктика: новые материалы, технологии и методы исследования».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Соколов В. М. Исследование силового воздействия промерзающего грунта на вертикальные элементы трубопроводов. Дис. ... канд. техн. наук. Л., 1976. 163 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/>
2. Цвигунов Д. Г. Взаимодействие сезоннопромерзающих грунтов с фундаментами вертикальных стержневых элементов. Дис. ... канд. техн. наук. М., 01007697231 (дата обращения: 22.03.2022).

2018. 24 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008718079> (дата обращения: 22.03.2022).
3. Бояринцев А. В. Полимерные и композитные сваи. Мировой и отечественный опыт // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2020. № 5. С. 22–27
 4. Осокин Н. И., Сосновский А. В., Чернов Р. А. Коэффициент теплопроводности снега и его изменчивость // Криосферы Земли. 2017. Т. XXI. № 3. С. 60–68.
 5. Горелик Я. Б., Паздерин Д. С. Корректность постановки и решения задач по прогнозу динамики температурных полей в основании сооружений на многолетнемерзлых грунтах // Там же. С. 49–59.
 6. Паздерин Д. С., Аксенов Д. В., Ерошеин А. Е., Федорова А. В. Корректность определения глубины сезонного оттаивания грунтов в условиях криолитозоны // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2019. № 3. С. 41–44.
 7. Далматов Б. И. Воздействие морозного пучения грунтов на фундаменты сооружений. Дис. ... д-ра техн. наук. М.-Л., 1955. 345 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005875153> (дата обращения: 22.03.2022).
 8. Кудрявцев С. А. Влияние миграционной влаги на процесс морозного пучения сезоннопромерзающих грунтов // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2003. № 7. С. 233–240.
 9. Кудрявцев С. А., Сахаров И. И., Парамонов В. Н. Промерзание и оттаивание грунтов (практические примеры и конечно-элементные расчеты). СПб : Геореконструкция, 2014. 248 с.
 10. Чистотинов Л. В. Миграция влаги в промерзающих неводонасыщенных грунтах. М. : Наука, 1973. 144 с.
 11. Мельников А. В. Лабораторные исследования вертикальных и горизонтальных нормальных сил и деформаций морозного пучения глинистого грунта // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 2. С. 126–131.
 12. Алексеев А. Г. Методика исследования давления, действующего на подпорные стены при промерзании–оттаивании грунта // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2007. № 3. С. 15–18.
 13. Chao G., Lu Zh. Frost heaving of foundation pit for seasonal permafrost areas // Magazine of Civil Engineering. 2019. No. 2. Pp. 61–71.
 14. Жирков А. Ф., Железняк М. Н., Пермяков П. П. [и др.]. Влияние инфильтрационных жидких атмосферных осадков на формирование температурного режима мерзлых грунтов // Вестник Забайкальского государственного университета. 2018. № 6. С. 4–14.

REFERENCES

1. Sokolov V. M. *Issledovanie silovogo vozdeystviya promerzayushchego grunta na vertikal'nye elementy truboprovodov* [Investigation of the force effect of freezing soil on vertical elements of pipelines]. Leningrad, 1976. 163 p. (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007697231> (accessed 22.03.2022).
2. Tsvigunov D. G. *Vzaimodeystvie sezonopromerzayushchikh gruntov s fundamentami vertikal'nykh sterzhnevnykh elementov*. Moscow, 2018. 24 p. (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008718079> (accessed 22.03.2022).
3. Boyarintsev A. V. Polymer and composite piles. World and domestic experience. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2020, no. 5, pp. 22–27. (In Russ.).
4. Osokin N. I., Sosnovskiy A. V., Chernov R. A. The coefficient of thermal conductivity of snow and its variability. *Kriosfery Zemli*, 2017, vol. XXI, no. 3, pp. 60–68. (In Russ.).
5. Gorelik Ya. B., Pazderin D. S. The correctness of the formulation and solution of tasks for predicting the dynamics of temperature fields at the base of structures on permafrost soils. *Ibid*, pp. 49–59. (In Russ.).
6. Pazderin D. S., Aksenov D. V., Eroshein A. E., Fedorova A. V. Correctness of determining the depth of seasonal thawing of soils in cryolithozone conditions. *PRONEFT'. Professional'no o neffti*, 2019, no. 3, pp. 41–44. (In Russ.).
7. Dalmatov B. I. *Vozdeystvie moroznogo pucheniya gruntov na fundamenty sooruzheniy* [The impact of frost heaving of soils on the foundations of structures]. Moscow, Leningrad, 1955. 345 p. (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005875153> (accessed 22.03.2022).
8. Kudryavtsev S. A. Influence of migration moisture on the process of frost heaving of seasonally freezing soils. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 2003, no. 7, pp. 233–240. (In Russ.).
9. Kudryavtsev S. A., Saharov I. I., Paramonov V. N. *Promerzanie i ottaivanie gruntov (prakticheskie primery i konechno-elementnye raschyoty)* [Freezing and thawing of soils. Practical examples and finite element calculations]. St. Petersburg, Georekonstruktsiya Publ., 2014, 248 p. (In Russ.).
10. Chistotinov L. V. *Migratsiya vlagi v promerzayushchikh nevodonasyshchennykh gruntakh* [Migration of moisture in freezing non-water-saturated soils]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 144 p. (In Russ.).
11. Mel'nikov A. V. Laboratory studies of vertical and horizontal normal forces and deformations of frost heaving of clay soil. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2012, no. 2, pp. 126–131. (In Russ.).
12. Alekseev A. G. Methodology for studying the pressure acting on retaining walls during freezing-thawing of the soil. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2007, no. 3, pp. 15–18. (In Russ.).
13. Chao G., Lu Zh. Frost heaving of foundation pit for seasonal permafrost areas. *Magazine of Civil Engineering*, 2019, no. 2, pp. 61–71.
14. Zhirkov A. F., Zheleznyak M. N., Permyakov P. P. et al. Influence of infiltration liquid atmospheric precipitation on the formation of the temperature regime of frozen soils. *Vestnik Zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, no. 6, pp. 4–14. (In Russ.).

Выбор основания фундаментов с учетом геологических и расчетных условий

Владимир Викторович КОНЮШКОВ, кандидат технических наук, доцент, v.konyushkov@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ),
190005 Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

Аннотация. Инженерно-геологические условия площадки, архитектурно-планировочные решения и нагрузки от зданий и сооружений во многом определяют выбор вариантов фундаментов по взаимодействию с грунтовым основанием. В зависимости от несущего слоя грунта различают фундаменты на естественном и искусственном основаниях, а также свайные фундаменты глубокого заложения. Выбор того или иного фундамента требует выполнения специальных геотехнических расчетов и технико-экономического сравнения вариантов, что занимает немало времени. Это связано с тем, что в геотехнике используются достаточно трудоемкие аналитические решения по выбору и расчету оснований фундаментов. Выполнена классификация вариантов выбора основания фундаментов с учетом инженерно-геологического строения, модуля деформации грунтов и действующих нагрузок, а также усовершенствованы некоторые аналитические решения по расчету оснований фундаментов. В результате проведенного сравнительного анализа классических и оптимизированных расчетов получена удовлетворительная сходимость всех результатов. Ускоренные расчеты рекомендуется применять для предварительного выбора наиболее оптимального варианта фундамента с точки зрения его надежного взаимодействия с основанием.

Ключевые слова: несущий слой грунта, естественное основание, искусственное основание, свайный фундамент

Для цитирования: Конюшков В. В. Выбор основания фундаментов с учетом геологических и расчетных условий // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 5. С. 24–30. doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.24-30

SELECTION OF THE BASE OF FOUNDATIONS TAKING INTO ACCOUNT GEOLOGICAL AND DESIGN CONDITIONS

Vladimir V. KONYUSHKOV, v.konyushkov@mail.ru

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-ya Krasnoarmeyskaya ul., 4,
St. Petersburg 190005, Russian Federation

Abstract. The engineering and geological conditions of the site, architectural and planning solutions and loads from buildings and structures largely determine the choice of foundation options for interaction with the soil base. Depending on the bearing layer of soil, foundations are distinguished on natural and artificial foundations, as well as pile foundations of deep laying. The choice of this or that foundation requires the performance of special geotechnical calculations and technical and economic comparison of options, which takes a lot of time. This is due to the fact that geotechnics uses quite time-consuming analytical solutions for the selection and calculation of foundations. The classification of the options for choosing the foundation base is carried out taking into account the engineering and geological structure, the modulus of soil deformation and operating loads, as well as some analytical solutions for the calculation of foundation bases are improved. As a result of the comparative analysis of classical and optimized calculations carried out, a satisfactory convergence of all results was obtained. It is recommended to use the rooted calculations for preliminary selection of the most optimal variant of the foundation in terms of its reliable interaction with the base.

Keywords: bearing layer of soil, natural base, artificial base, pile foundation

For citation: Konyushkov V. V. Selection of the Base of Foundations Taking Into Account Geological and Design Conditions. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2022, no. 5, pp. 24–30. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.24-30

Современному геотехнику важно уметь анализировать инженерно-геологические условия площадки и предварительно назначать оптимальные варианты фундаментов до выполнения специализированных расчетов [1–3]. Классификация вариантов фундаментов в зависимости от инженерно-геологического строения и модуля деформации грунтов площадки приведена на рис. 1 (фундаменты не-

глубокого заложения – схемы а, б, глубокого заложения – схемы в–д).

Назначение несущего слоя грунта для фундаментов неглубокого заложения

Одной из важнейших характеристик для грунтов естественных и искусственных оснований у фундаментов неглубокого заложения служит расчетное

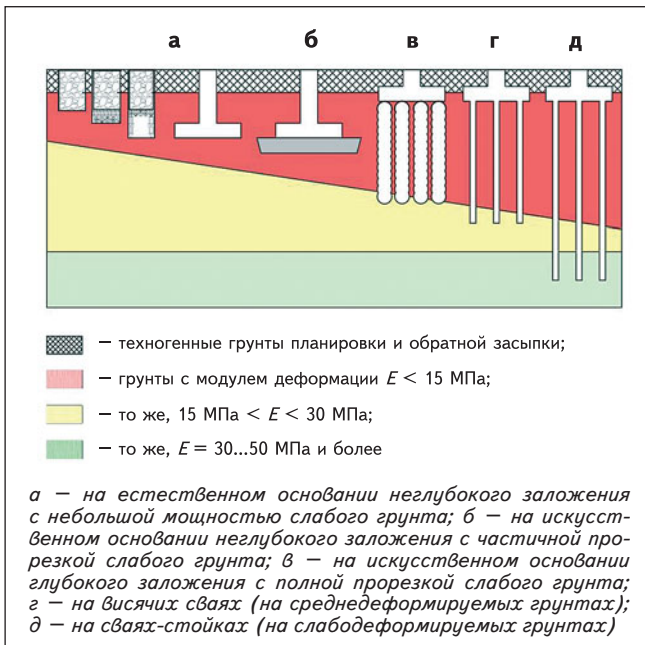


Рис. 1. Классификация вариантов фундаментов по взаимодействию с грунтовым основанием

сопротивление на сжатие R . Расчетное сопротивление грунта под подошвой фундамента дает численное значение допускаемого давления на грунтовое основание. В инженерной практике расчетное сопротивление грунта вычисляется по сложной длинной формуле, оно зависит от физико-механических характеристик грунтов, геометрических параметров фундамента и множества коэффициентов (всего 14 составляющих!). Фактически же для предварительного выбора несущего слоя грунта можно использовать нормативные значения расчетных сопротивлений, которые зависят от вида грунтов, их плотности сложения и влажности. Нормативные значения можно найти в справочных материалах [4]. Интервалы расчетных сопротивлений R в зависимости от вида грунтов составляют 100–600 кПа. Для грунтов с $R < 100$ кПа их применение в качестве несущего слоя в основании фундаментов не рекомендуется. Для грунтов с $R = 150...300$ кПа допускается рассмотреть возможность использования их в качестве несущего слоя в основании фундаментов под 5–10-этажные здания, а для грунтов с $R = 300...600$ кПа – в качестве основания фундаментов под 10–25-этажные здания.

Ускоренный способ определения давления, действующего на грунтовое основание

Выбор варианта фундамента по взаимодействию с грунтовым основанием также зависит от действующих нагрузок от здания или сооружения [5–20]. Современный инженер выполняет сбор нагрузок путем численного моделирования в программных комплексах. Однако для оперативного вычисления давле-

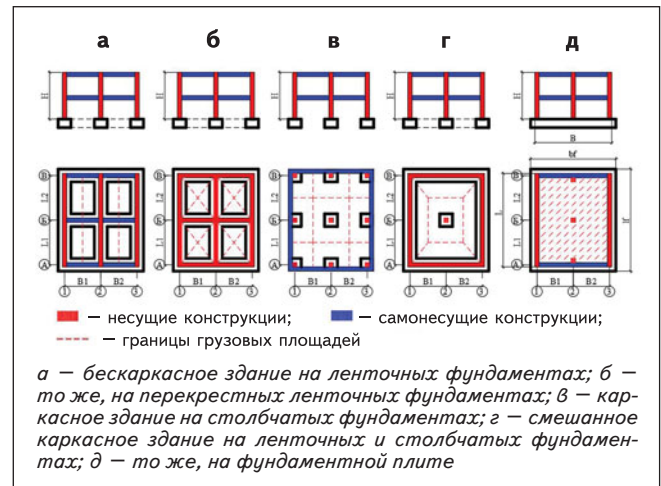


Рис. 2. Схемы сбора нагрузок на фундаменты в зависимости от конструктивных схем зданий

ния, действующего на грунтовое основание, можно применить упрощенное решение – метод статических грузовых площадей с приведенным удельным весом строительных конструкций здания.

Схемы сбора нагрузок на фундаменты в зависимости от конструктивных схем зданий показаны на рис. 2. Зависимости по определению сосредоточенной нагрузки на обрез фундамента и давления, распределенного под подошвой фундамента, приведены в формулах (1, 2).

Сумма сил от веса надземных конструкций на обрез плитного, ленточного или столбчатого фундаментов равна:

$$\sum N_0 = \gamma_{пр} H A, \quad (1)$$

где $\gamma_{пр} = 5 \text{ кН/м}^3$ – приведенный удельный вес надземных конструкций здания; H – высота здания, м; $A = \sum B_i \sum L_i$ – площадь, которая зависит от расположения несущего строительного элемента, количества и размеров пролетов B_1, B_2, L_1, L_2 , входящих в грузовую площадь элемента (стены и колонны здания); B_1, B_2, L_1, L_2 – размеры пролетов в осях по ширине и длине здания, м.

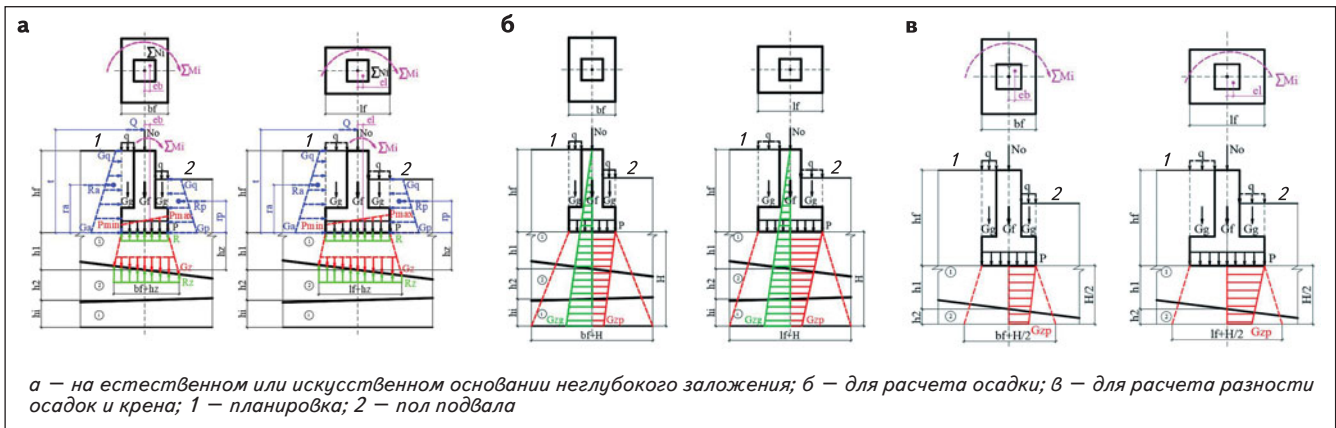
Давление на грунт от плитного, ленточного или столбчатого фундаментов, кПа, можно определить по формуле

$$P = \frac{\sum N_0 + G_f + G_g}{b_f l_f}, \quad (2)$$

где $G_f = V_f \gamma_f$ – собственный вес, кН, объем, м^3 , и удельный вес материала фундамента, кН/м^3 ; $G_g = V_g \gamma_g$ – собственный вес, объем и удельный вес грунта на уступах фундамента; b_f – ширина подошвы фундамента, м; l_f – длина подошвы фундамента, м.

Основные расчетные проверки основания фундаментов неглубокого заложения

Фундаменты неглубокого заложения выполняют на естественном и искусственном основаниях глубиной 1,5–5 м (см. рис. 1, варианты а, б). С ис-



а – на естественном или искусственном основании неглубокого заложения; б – для расчета осадки; в – для расчета разности осадок и крена; 1 – планировка; 2 – пол подошвы

Рис. 3. Разрезы фундамента по ширине (слева) и длине (справа) для расчетных проверок

пользованием разрезов фундамента по ширине и длине (рис. 3, схема а) выполняют расчетные проверки условий (3–6), в которых средние и крайние давления сравниваются с расчетным сопротивлением грунта в основании подошвы фундамента и грунта, подстилающего несущий слой:

$$P = \frac{\sum N_0 + G_f + G_g}{b_f l_f} < R; \quad (3)$$

$$P_{\max} = P \left(1 + \frac{6e_b(e_l)}{b_f(l_f)} \right) < 1,2 R; \quad (4)$$

$$P_{\min} = P \left(1 - \frac{6e_b(e_l)}{b_f(l_f)} \right) > 0; \quad (5)$$

$$\frac{P_{\max}}{P_{\min}} < 4, \quad (6)$$

где $\sum N_0, G_f, G_g, b_f, l_f$ – те же обозначения, что и в формулах (1, 2); G_q, G_a, G_p – соответственно горизонтальные давления грунта на фундамент (активное и пассивное, за счет которых образуется эксцентриситет e), кПа; $e_b(e_l) = \sum M_i / \sum N_i$ – эксцентриситет относительно ширины и длины подошвы фундамента (смещение суммы вертикальных сил от всех вертикальных нагрузок относительно центра тяжести подошвы фундамента от воздействия суммы горизонтальных нагрузок и моментов, м); R_a, r_a, R_p, r_p – соответственно равнодействующие активного и пассивного давления и их плечи относительно подошвы фундамента, кН, м; h_f, h_1, h_2, h_i – соответственно высота фундамента и толщина слоев грунтов под подошвой фундамента, м; R – расчетное сопротивление грунта под подошвой фундамента, принимаемое по справочным материалам в зависимости от вида грунта, кПа, [4].

При невыполнении условий (3–6) увеличивают геометрические параметры фундамента (глубина заложения, ширина подошвы) либо искусственно улучшают прочностные характеристики грунтов основания. Если условия (3–6) все равно не выполняются, то рассматривается фундамент глубокого заложения (с полной прорезкой слабого грунта ис-

кусственным или свайным основанием по вариантам в–д на рис. 1).

1. Проверка условия слабого подстилающего слоя грунта

В сложных инженерно-геологических условиях площадки со слабыми грунтами возможно пере-слаивание прочных и слабых грунтов по глубине. В этом случае необходимо выполнить проверку слабого подстилающего слоя с учетом его расположения под подошвой несущего слоя грунта (см. рис. 3, схема а) по формуле

$$\sigma_z + \sigma_{zg} = \frac{\sum N_0 + G_f + G_g}{(b_f + h_z)(l_f + h_z)} + \gamma_g h_z < R_z, \quad (7)$$

где σ_z – дополнительное напряжение на кровле слабого под-стилающего слоя (под несущим слоем грунта в основании фундамента), кПа; σ_{zg} – природное напряжение от собственного веса несущего слоя грунта под подошвой фундамента, кПа; γ_g – удельный вес несущего слоя грунта под подошвой фундамента, кН/м³; h_z – мощность несущего слоя грунта под подошвой фундамента, м; R_z – расчетное сопротивление слабого подстилающего грунта, расположенного под несущим слоем грунта основания, кПа, [4].

В случае если условие (7) не выполняется, то де-формации основания рассчитывают по формулам (8–11) и принимают решение о применимости или неприменимости фундамента неглубокого заложения.

2. Проверка условий деформативности основания фундамента

Самой главной проверкой основания фундамента становится расчет по второй группе предельных со-стояний (деформациям). В инженерной практике расчеты деформаций оснований довольно трудоем-кие, так как в этих методах необходимо рассчиты-вать и чертить эпюры, определять коэффициенты из таблиц, графиков и т. д. Автор данной статьи реко-

мендует выполнять расчет деформаций оснований по разрезам по ширине и длине фундамента (см. рис. 3, схема б) и формулам (8–11):

$$S_{\max} = \frac{(P + \sigma_{zp}^{\text{центр}})H}{2E_{\text{оср}}} < S_{\text{ult}}; \quad (8)$$

$$\sigma_{zp}^{\text{центр}} = \frac{\sum N_0 + G_f + G_g}{(b_f + H)(l_f + H)}, \quad (9)$$

где S_{\max} – максимальная осадка фундамента от давления, м; P – давление по подошве фундамента, кПа; $\sigma_{zp}^{\text{центр}}$ – дополнительное напряжение под центром фундамента на глубине H , где выполняется условие $0,2\sigma_{zg} \approx \sigma_{zp}^M$, кПа; $\sigma_{zg} = \gamma_{\text{оср}}H$ – природное напряжение от собственного веса грунта, кПа; $\gamma_{\text{оср}} = \sum \gamma_i h_i / \sum h_i$ – осредненное значение удельного веса грунтов в пределах сжимаемой толщи, кН/м³; H – глубина активной сжимаемой толщи грунтов, где выполняется условие $0,2\sigma_{zg} \approx \sigma_{zp}^{\text{центр}}$, м; $E_{\text{оср}} = \sum E_i h_i / \sum h_i$ – осредненное значение модуля деформации грунтов в пределах сжимаемой толщи H , кПа; S_{ult} – предельное значение осадки по нормативным документам, м.

3. Проверка условия относительной разности осадок

Для проверки условия относительной разности осадок воспользуемся уравнением

$$\Delta S = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{L_{\min}} < \Delta S_{\text{ult}}, \quad (10)$$

где S_{\max} – максимальная осадка, м, которую рассчитывают, как правило, под центром фундамента (либо в другой точке) на глубине H , где выполняется условие $0,2\sigma_{zg} \approx \sigma_{zp}^{\text{центр}}$; S_{\min} – минимальная осадка, м, рассчитанная, как правило, под углом фундамента (либо в другой точке), где вертикальное напряжение под углом фундамента выражено зависимостью $\sigma_{zp}^{\text{угол}} \approx 1/4 \sigma_{zp}^{\text{центр}}$, при этом $\sigma_{zp}^{\text{центр}}$ определяется на глубине $1/2 H$; L_{\min} – минимальное расстояние между осадками, м; ΔS_{ult} – предельное значение относительной разности осадок по нормативным документам.

4. Проверка условия крена

Выполним проверку условия крена с использованием формулы

$$i_b(i_l) = \frac{1 - \nu^2}{E} \frac{k_e \sum M_i}{\left(\frac{b_f(l_f)}{2}\right)^3} < i_{\text{ult}}, \quad (11)$$

где ν – коэффициент Пуассона для грунта в основании фундамента; k_e – коэффициент определяют по нормативным документам, его значение зависит от соотношения сторон фундамента l_f/b_f . Если $\sum M_i$ действует вдоль b_f , $k_e = 0,07...0,5$ или вдоль l_f , $k_e = 0,5...2$; $\sum M_i$ – равнодействующая суммы моментов сил, приведенная к уровню подошвы фундамента, кН·м; E – модуль деформации грунта под подошвой фундамента, кПа; i_{ult} – предельное значение крена по нормативным документам.

Если условия (8, 10, 11) выполняются, то основание проходит по деформациям. Можно переходить к

проектированию фундамента неглубокого заложения (рассчитывать материал фундамента, разрабатывать опалубочные и арматурные чертежи и т. п.).

Для расчета разности осадок и крена используют разрезы фундамента (рис. 3, схема в).

5. Проверка условия на всплытие подземного сооружения

Современные здания и сооружения могут иметь достаточно развитое подземное пространство глубиной 5–20 м. В случае сложных гидрогеологических условий площадки (подтапливаемая территория, близкое расположение уровня подземных вод к планировочной отметке рельефа, наличие напорных водоносных горизонтов и т. д.) необходимо производить проверку этого сооружения на всплытие (рис. 4) по формуле

$$\gamma_f > \frac{\sum N_i}{G_w}, \quad (12)$$

где $\gamma_f = 1,2$ – коэффициент надежности по нагрузке; $\sum N_i$ – сумма всех вертикальных постоянных нагрузок от собственного веса сооружения, кН; $G_w = b_f l_f L_w \gamma_w$ – суммарное гидростатическое давление от подземных вод на фундамент сооружения, кН; L_w – расстояние от уровня подземных вод до подошвы сооружения, м; γ_w – удельный вес воды, кН/м³.

Если условие (12) не выполняется, то следует понижать уровень подземных вод, увеличивать вес сооружения либо применить вариант фундамента глубокого заложения (свайный).

Основные расчетные проверки фундаментов глубокого заложения

Фундаменты глубокого заложения в виде искусственного основания с полной прорезкой слабых грунтов или свайного фундамента применяют при значительных нагрузках на основание (многоэтажные тяжелые здания), а также в случае наличия на площадке сильнодеформируемых грунтов с $E < 15$ МПа и мощностью более 10–20 м. Схемы основных расчетных проверок фундаментов глубокого заложения приведены на рис. 5. Для расчета используют формулы (13–17).

1. Проверка допустимой нагрузки на одиночную висячую сваю

Общая длина фундаментов глубокого заложения закладывается таким образом, чтобы искусственным закреплением грунтов или сваями пройти все слабые грунты и передать нагрузку от сооружения на более прочный нижележащий грунт с $E > 15$ МПа (см. рис. 1, варианты в–д и рис. 5, схема а). В первом приближении определяется несущая способность одиночной висячей сваи по грунту F_d , и эта величина сравнивается с действующей нагрузкой на сваю N_i по условию

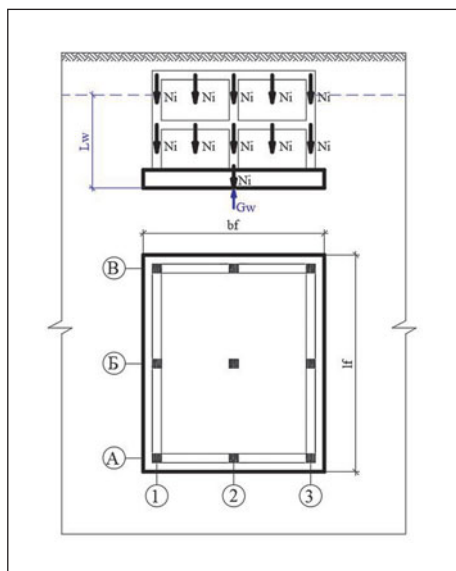


Рис. 4. Схема расчетной проверки на всплытие подземного сооружения

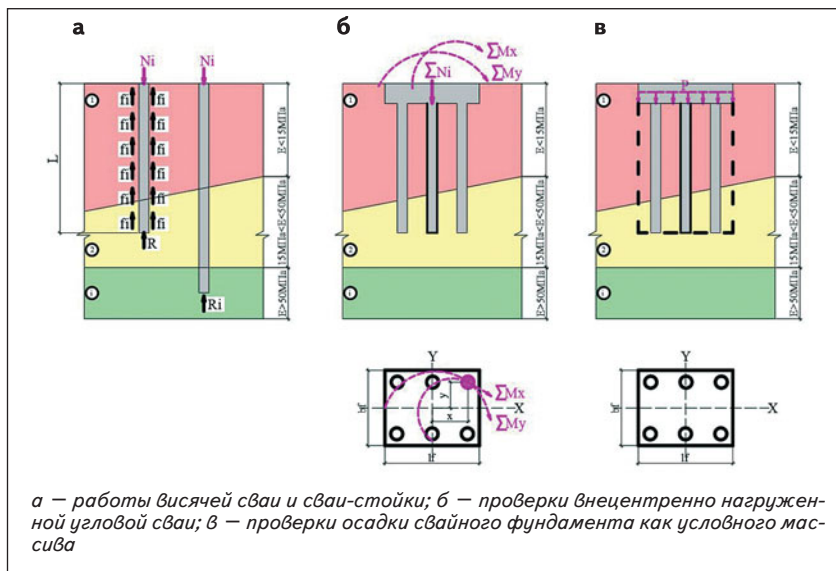


Рис. 5. Схемы для расчетных проверок фундаментов глубокого заложения

$$F_d = L\pi d\sigma > N_i, \quad (13)$$

где L — длина сваи, м; d — диаметр сваи, м; $\sigma = \sum f_i + R$ — суммарное сопротивление грунта по боковой поверхности и под пятой сваи, кПа; $\sigma \approx 50$ кПа — в случае расположения боковой поверхности сваи в грунтах с $E < 15$ МПа и опиранием пяты сваи на грунт с $15 \text{ МПа} < E < 30$ МПа; $\sigma \approx 70$ кПа — то же, $30 \text{ МПа} < E < 50$ МПа; $N_i = \sum N_i / n_{req}$ — вертикальная нагрузка на одиночную сваю, кН; $\sum N_i$ — сумма вертикальных нагрузок на подошву ростверка, кН; n_{req} — количество свай в ростверковой плите, шт.

2. Проверка допустимой нагрузки на одиночную сваю-стойку

Если в пределах 20–30 м от планировочной отметки рельефа расположены скальные или полускальные грунты с $E > 50$ МПа, то целесообразно довести нижнюю часть сваи до этих грунтов (см. рис. 5, схема а). В этом случае свая будет работать как стойка и ее несущую способность определим по формуле

$$F_{di} = R_i A > N_i, \quad (14)$$

где $R_i = 20\,000$ кПа — сопротивление скального и полускального грунта на сжатие в случае опирания пяты сваи на грунт с $E > 50$ МПа; A — площадь поперечного сечения сваи, м².

3. Проверка условия требуемого количества свай

Искусственное основание может выполняться сплошным массивом или в виде отдельных элементов, расположенных с определенным шагом. Свайный фундамент, как правило, имеет среднее расстояние между сваями в осях $3d-10d$ (шаг сваи определяется инженерно-геологическими условиями площадки, нагрузками, конструктивными решения-

ми здания и фундамента). В зависимости от конструкции фундамента, шага и количества свай, расчеты фундаментов глубокого заложения могут выполняться по схеме или условного массива, или свайного фундамента с отдельными несущими элементами. Требуемое количество свай в ростверке находим с коэффициентом запаса 1,2–1,5 (для учета воздействия изгибающих моментов и горизонтальных усилий):

$$n_{req} = 1,2 \dots 1,5 \frac{\sum N_i}{F_d}. \quad (15)$$

4. Проверка условия внецентренно нагруженной угловой сваи

При значительных изгибающих моментах и горизонтальных усилиях, действующих в уровне подошвы ростверковой плиты, необходимо проверить самую нагруженную угловую сваю (см. рис. 5, схема б) по формуле

$$N_{max} = \frac{\sum N_i}{n_{req}} \pm \frac{\sum M_x y}{\sum y_i^2} \pm \frac{\sum M_y x}{\sum x_i^2} < F_d, \quad (16)$$

где $\sum M_x, \sum M_y$ — сумма изгибающих моментов относительно главных осей подошвы ростверка X, Y , кН·м; x, y — расстояния от центра главных осей X, Y до оси наиболее нагруженной изгибающими моментами угловой сваи, м; $\sum x_i^2, \sum y_i^2$ — сумма квадратов расстояний от главных осей X, Y до оси каждой сваи, м.

5. Проверка условия осадки фундамента глубокого заложения

Осадку фундаментов глубокого заложения (см. рис. 5, схема в) можно рассчитать по упрощенной формуле

$$S = \frac{0,12 P b_f}{E} < S_{ult}, \quad (17)$$

где P — давление в уровне подошвы ростверковой плиты, кПа; E — модуль деформации грунта под пятой свайного фундамента, кПа; S_{ult} — предельное значение осадки свайного фундамента по требованиям нормативных документов, м.

В ы в о д

В последние годы классические аналитические расчеты оснований и фундаментов часто заменяют численным моделированием, имеющим значительные вычислительные возможности (скорость, простота, эффективность и наглядность и т. д.). Однако

нельзя пренебрегать опытом аналитических решений, которые успешно работают уже многие годы. Без понимания и применения их фундаментальных принципов невозможно правильно оценивать совместную работу фундаментов с основанием и принимать обоснованные технические решения. Ускоренные методы расчетов, рекомендуемые автором данной статьи, могут применяться для структурно-устойчивых грунтов в стабилизированном состоянии в качестве дополнительных расчетов фундаментов на естественном, искусственном или свайном основаниях и сравнительного анализа с результатами численного моделирования.

С П И С О К И С Т О Ч Н И К О В

1. Филиппов Н. Б., Спиридонов М. А., Бахарев Т. С. [и др.]. Геологический атлас Санкт-Петербурга. СПб : Комильфо, 2009. 57 с.
2. Дашко Р. Э., Александрова О. Ю., Котюков П. В., Шидловская А. В. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Развитие городов и геотехническое строительство. 2011. № 1. С. 1–47.
3. Konyushkov V., Le Van Trong. Side friction of sandy and clay soils and their resistance under the toe of deep bored piles (at a depth of up to 100 m) [Боковое трение песчаных и глинистых грунтов и их сопротивление под пятой глубоких буровых свай (длиной до 100 м)] // Architecture and Engineering. 2020. Vol. 5. Iss. 1. Pp. 36–44. doi: 10.23968/2500-0055-2020-5-1-36-44
4. Ильичев В. А., Мангушев Р. А. [и др.]. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. М. : АСВ, 2016. 1031 с.
5. Шулятьев О. А. Основания и фундаменты высотных зданий. М. : АСВ, 2016. 392 с.
6. Шулятьев О. А., Мозгачева О. А., Поспехов В. С. Освоение подземного пространства городов. М. : АСВ, 2017. 510 с.
7. Мангушев Р. А., Ершов А. В., Осокин А. И. Современные свайные технологии. М. : АСВ, 2010. 240 с.
8. Конюшков В. В., Кондратьева Л. Н., Кириллов В. М., Ле Ван Чонг. Ускоренные способы определения несущей способности буровых свай // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 3(74). С. 52–60.
9. Дьяконов И. П., Веселов А. А., Кондратьева Л. Н. Теоретические предпосылки оценки величины трения по боковой поверхности свай «Фундекс» // Жилищное строительство. 2017. № 11. С. 30–33.
10. Верстов В. В., Гайдо А. Н. Технология устройства свай и свайных фундаментов. СПб : СПбГАСУ, 2010. 180 с.
11. Мангушев Р. А., Сахаров И. И. Основания и фундаменты. М. : АСВ, 2019. 468 с.
12. Мангушев Р. А., Конюшков В. В., Дьяконов И. П. Анализ практического применения завинчиваемых набивных свай // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2014. № 5. С. 11–16.
13. Мангушев Р. А., Готман А. Л., Знаменский В. В., Пономарев А. Б. Сваи и свайные фундаменты. Конструирование, проектирование и технологии. М. : АСВ, 2015. 320 с.
14. Мангушев Р. А., Осокин А. И., Конюшков В. В. [и др.]. Проектирование оснований, фундаментов и подземных сооружений. М. : АСВ, 2021. 632 с.
15. Шашкин А. Г. Проектирование зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга. М. : Академическая наука — Геомаркетинг, 2014. 352 с.
16. Лушников В. В., Ярдяков А. С. Анализ расчетов осадок в нелинейной стадии работы грунта // Вестник ПНИПУ. Строительство и Архитектура. 2014. № 2. С. 44–55.
17. Тер-Мартirosян А. З., Тер-Мартirosян З. Г., Лузин И. Н. Напряженно-деформированное состояние оснований фундаментов глубокого заложения // Вестник ПНИПУ. Строительство и Архитектура. 2017. Т. 8. № 2. С. 96–103. doi: 10.15593/2224-9826/2017.2.09
18. Phoon Kok-Kwang, Ching Jianye. Risk and reliability in geotechnical engineering [Риск и надежность в инженерно-геологических работах]. London; New York, CRC Press; Taylor and Francis group, 2015. 594 p.
19. Kun Song, Lu Gongda, Zhang Guodong, Liu Yiliang. Influence of uncertainty in the initial groundwater table on long term stability of reservoir landslides [Влияние неопределенности начального уровня подземных вод на долгосрочную устойчивость оползней водохранилища] // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2017. No. 3. Pp. 901–908.
20. Failmezger R. A., Bullock P. J., Handy R. L. Site variability, risk and beta [Изменчивость площадки, риск и параметр бета] // Proc. ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization. Rotterdam, Millpress, 2004, pp. 913–920.

R E F E R E N C E S

1. Filippov N. B., Spiridonov M. A., Bakharev T. S. et al. *Geologicheskii atlas Sankt-Peterburga* [Geological atlas of St. Petersburg]. St. Petersburg, Komilfo Publ., 2009. 57 p. (In Russ.).
2. Dashko R. E., Aleksandrova O. Yu., Kotyukov P. V., Shidlovskaya A. V. Features of engineering-geological conditions of St. Petersburg. *Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 2011, no. 13, pp. 25–71. (In Russ.).
3. Konyushkov V., Le Van Trong. Side friction of sandy and clay soils and their resistance under the toe of deep bored piles (at a depth of up to 100 m). *Architecture and Engineering*, 2020, vol. 5, iss. 1, pp 36–44. doi: 10.23968/2500-0055-2020-5-1-36-44
4. Il'ichev V. A., Mangushev R. A. *Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenty i podzemnie sooruzheniya* [Handbook of geotechnics. Bases and foundations and underground structures]. Moscow, ASV Publ., 2016. 1031 p. (In Russ.).
5. Shulyatyev O. A. *Osnovaniya i fundamenty vysoknykh zdaniy* [Bases and foundations of high-rise buildings]. Moscow, ASV Publ., 2016, 392 p. (In Russ.).
6. Shulyatyev O. A., Mozgachyova O. A., Posphehov V. S. *Osvoenie podzemnogo prostranstva gorodov* [Development of underground space of cities]. Moscow, ASV Publ., 2017. 510 p. (In Russ.).
7. Mangushev R. A., Ershov A. V., Osokin A. I. *Sovremennye svainye tehnologii* [Modern pile technologies]. Moscow, ASV Publ., 2010. 240 p. (In Russ.).
8. Konyushkov V. V., Kondratieva L. N., Kirillov V. M., Le Van Trong. Accelerated methods for determining the bearing capacity of drill piles. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2019, no. 3(74), pp. 52–60. (In Russ.).
9. Dyakonov I. P., Veselov A. A., Kondratyeva L. N. Theoretical background estimation of the magnitude of friction on the lateral surface of the piles "Fundex". *Zhilishnoe stroitel'stvo*, 2017, no. 11, pp. 30–33. (In Russ.).
10. Verstov V. V., Gaido A. N. *Technologie ustroystva svai i svainykh fundamentov* [The technology of piling and pile foundations]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2010, 180 p. (In Russ.).
11. Mangushev R. A., Sakharov I. I. *Osnovaniya i fundamenty* [Bases and foundations]. Moscow, ASV Publ., 2019. 468 p. (In Russ.).
12. Mangushev R. A., Konyushkov V. V., Dyakonov I. P. Analysis of practical application of screw paked piles. *Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov*, 2014, no. 5, pp. 11–16. (In Russ.).
13. Mangushev R. A., Gotman A. L., Znamenskiy V. V., Ponomarev A. B. *Svai i svainye fundamenty. Konstruirovaniye, proektirovaniye i tekhnologii* [Piles and pile foundations. Design, engineering and technologies]. Moscow, ASV Publ., 2015. 320 p. (In Russ.).
14. Mangushev R. A., Osokin A. I., Konyushkov V. V. et al. *Proektirovaniye osnovaniy, fundamentov i podzemnykh sooruzheniy* [Projecting of bases, foundations and underground structures]. Moscow, ASV Publ., 2021. 632 p. (In Russ.).
15. Shashkin A. G. *Proektirovaniye zdaniy i sooruzheniy v slozhnykh ingenerno geologicheskikh usloviyakh* [Design of buildings and structures in complex engineering and geological conditions of St. Petersburg]. Moscow, Akademicheskaya nauka – Geomarketing Publ., 2014. 352 p. (In Russ.).
16. Lushnikov V. V., Yerdyakov A. S. Analysis of sediment calculations in the nonlinear stage of soil work. *Vestnik PNRPU. Stroitel'stvo i Arhitektura*, 2014, no. 2, pp. 44–55. (In Russ.).
17. Ter-Martirosyan A. Z., Ter-Martirosyan Z. G., Luzin I. N. The stress-deformed combined state of the foundations of deep foundations. *Vestnik PNRPU. Stroitel'stvo i Arhitektura*, 2017, vol. 8, no. 2, pp. 96–103. (In Russ.). doi: 10.15593/2224-9826/2017.2.09
18. Phoon Kok-Kwang, Ching Jianye. *Risk and reliability in geotechnical engineering*. London; New York, CRC Press; Taylor and Francis group, 2015. 594 p.
19. Kun Song, Lu Gongda, Zhang Guodong, Liu Yiliang. Influence of uncertainty in the initial groundwater table on long term stability of reservoir landslides. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2017, no. 3, pp. 901–908.
20. Failmezger R. A., Bullock P. J., Handy R. L. Site variability, risk and beta. *Proc. ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. Rotterdam, Millpress, 2004, pp. 913–920. ■

Приказом Минобрнауки России от 24.02.2021 г. № 118 утверждена новая номенклатура научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени. Журнал «ПГС» входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук, по специальностям:

- 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения;
- 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения;
- 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение;
- 2.1.4. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов;
- 2.1.5. Строительные материалы и изделия;
- 2.1.7. Технология и организация строительства;
- 2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей;
- 2.1.9. Строительная механика;
- 2.1.10. Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства;
- 1.6.6. Гидрогеология.



УДК 556.388

doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.31-37

Изыскания и ликвидация загрязнений грунтовых вод

Елена Александровна КОРНЕЕВА, аспирантка, старший преподаватель, ekorneeva@internet.ru

Алексей Петрович АВСЮКЕВИЧ, кандидат технических наук, доцент, aap.spbgasu@yandex.ru

Анатолий Валентинович КУДРЯВЦЕВ, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой водопользования и экологии, argo14@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ),
190005 Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

Аннотация. Рассмотрена проблема экологического ущерба в результате хозяйственной и иной деятельности предприятий, связанных с хранением, транспортировкой или переработкой нефтепродуктов. Особое внимание уделено вопросам загрязнения грунтовых вод нефтепродуктами, отмечены характер и виды загрязнения нефтепродуктами. Проанализированы нормативные документы, используемые при инженерно-экологических изысканиях загрязнений грунтовых вод, а также отмечены недостатки этих нормативов. Дана оценка эффективности выполнения работ по существующей нормативной базе. Приведены основные факторы совершения систематических ошибок при выполнении инженерно-экологических изысканий на предмет нахождения линзы нефтепродуктов в подземной толще. Описана специфичность загрязнений нефтепродуктами и зависимость их миграции от различных факторов. Предложен алгоритм реализации инженерно-экологических изысканий. Подчеркивается, что содержащиеся в нормативных документах рекомендации не соответствуют специфике работ по изысканиям загрязнений грунтовых вод, в этой связи исполнители часто выполняют работы неэффективно, получают недостоверные данные. В целях повышения эффективности проведения инженерно-экологических изысканий необходимо создание рекомендаций для подготовки соответствующих нормативных документов.

Ключевые слова: нормативные документы, подземные воды, загрязнение грунтовых вод, нефтепродукты, инженерно-экологические изыскания, мониторинг, миграция нефтепродуктов, мероприятия по ликвидации загрязнений грунтовых вод

Для цитирования: Корнеева Е. А., Авсюкевич А. П., Кудрявцев А. В. Изыскания и ликвидация загрязнений грунтовых вод // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 5. С. 31 – 37.
doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.31-37

ON THE ISSUE OF SEARCH FOR AND ELIMINATION OF GROUNDWATER POLLUTION

Elena A. KORNEEVA, ekorneeva@internet.ru

Alexey P. AVSYUKEVICH, aap.spbgasu@yandex.ru

Anatoly V. KUDRYAVTSEV, argo14@mail.ru

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-ya Krasnoarmeyskaya ul., 4,
St. Petersburg 190005, Russian Federation

Abstract. The problem of environmental damage as a result of economic and other activities of enterprises related to the storage, transportation or processing of petroleum products is considered. Special attention is paid to the issues of groundwater pollution with petroleum products, the nature and types of pollution with oil products are noted. The content of existing regulatory documents used in engineering and environmental surveys of groundwater pollution is analyzed, also the disadvantages of these the regulatory documents are given. The main factors of committing systematic errors in the performance of engineering and environmental surveys in order to find a lens of oil products in the underground layer are given. The specificity of oil pollution and the dependence of their migration on various factors are described. An algorithm for the implementation of engineering and environmental surveys is proposed. It is emphasized that the recommendations listed in the current regulatory documents do not correspond to the specifics of the work on the investigation of groundwater pollution, in this regard, the performers often do not perform the work efficiently, do not receive reliable data. In order to improve the efficiency of engineering and environmental surveys, it is necessary to create recommendations for the preparation of appropriate regulatory documents.

Keywords: regulatory documents, groundwater, groundwater pollution, petroleum products, engineering and environmental surveys, monitoring, migration of petroleum products, measures to eliminate groundwater pollution

For citation: Korneeva E. A., Avsyukevich A. P., Kudryavtsev A. V. On the Issue of Search for and Elimination of Groundwater Pollution. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2022, no. 5, pp. 31 – 37. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.31-37

Введение

Проблема экологического ущерба в результате хозяйственной и иной деятельности чрезвычайно актуальна для России. В настоящее время главные источники негативного воздействия на подземные воды — объекты с накопленным экологическим ущербом. Известно, что основными загрязняющими веществами являются фенолы, нефтепродукты, соединения меди, цинка, нитратный азот, ртуть, марганец и т. д. Все эти вещества образуются в результате деятельности различных предприятий [1, 2].

Указом президента РФ от 02.07.2021 г. № 400 утверждена стратегия национальной безопасности. Пункт 81 стратегии разделяет такие понятия, как рекультивация нарушенных земель и экологическая реабилитация территорий и водных объектов. Также экологическая реабилитация предусмотрена в национальном проекте «Экология». По рекультивации нарушенных земель принято большое количество нормативных документов, а вот по экологической реабилитации водных объектов и территорий их явно недостаточно. В то же время по ликвидации загрязнений подземных вод такие документы вообще отсутствуют.

Значительную часть отравляющих подземное пространство веществ составляют нефтепродукты, которые попадают туда в результате деятельности нефтеперерабатывающих заводов и нефтебаз, авиационных площадок, терминалов хранения нефтепродуктов и т. д. Согласно данным Росстата [3], на территории РФ количество загрязняющих веществ, поступивших в толщу пород и подземные воды с предприятий, достигает колоссальных объемов. В результате образуются техногенные подземные скопления нефтепродуктов (далее — НП) в виде различных их прояв-

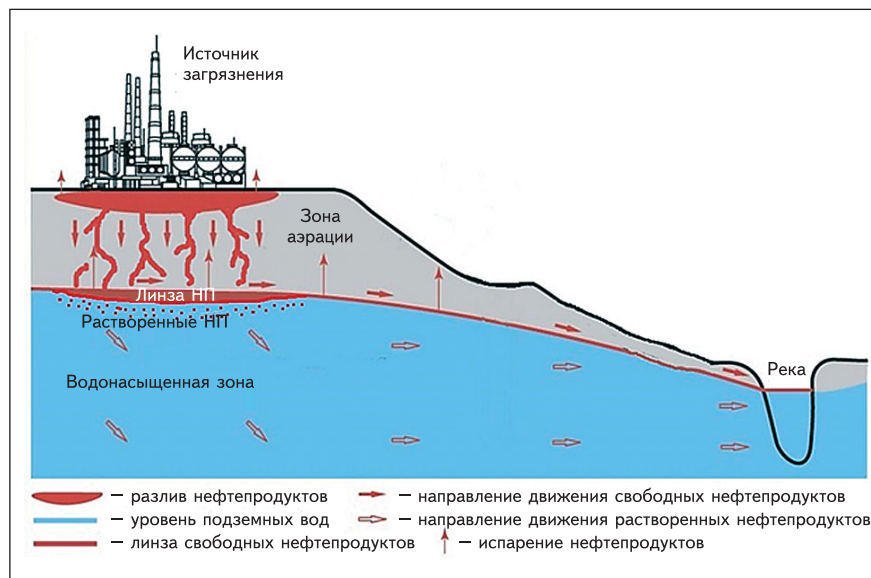


Рис. 1. Схема формирования линзы избыточного содержания нефтяных углеводородов

лений: плавающей линзы, зон растекания НП, растворенных НП [4, 5]. Площадь таких скоплений может достигать значительных масштабов, а мощность слоя НП — более 2–3 м [6, 7].

Методика и результаты исследования

Решение проблем, связанных с объектами накопленного вреда для подземных вод, требует больших затрат, а также внесения поправок и дополнений в целый ряд нормативных правовых актов. Предприятия могут десятилетиями загрязнять земельные участки, а затем при смене владельца или отказе от земель передают ответственность за ликвидацию экологического ущерба государству [8]. При этом в законодательстве есть нормы, которые позволяют привлечь такие предприятия к ответственности. Однако доказать, что загрязнения появились на конкретном земельном участке в результате хозяйственной деятельности конкретного лица, проблематично. Так, в процессе миграции НП в подземных водах основная линза НП может оказаться под частными территориями, вблизи про-

мышленного объекта, что усложняет ликвидацию или вообще делает ее невозможной в связи с отсутствием доступа к ней. В целом пробелы в законодательных и иных нормативных правовых актах не позволяют наладить эффективную работу по ликвидации объектов накопленного вреда окружающей среде и недопущению их возникновения в будущем.

В результате утечек НП на предприятиях формируется нефтяное загрязнение, медленно распространяющееся течением грунтовых вод к месту разгрузки (рис. 1). Такие загрязнения копятся десятилетиями, распространяясь на территории по ходу миграции, разгружаясь в поверхностных источниках.

Выделяют несколько видов скоплений НП. Это, прежде всего, плавающая линза нефтепродуктов, которая формируется в виде локальной зоны непосредственно на поверхности грунтовых вод. Скопление НП происходит из-за превышения плотности воды над плотностью массы этих продуктов, а также ограниченной способности жидких НП к растворению в воде и другим фор-

мам взаимосмещения. Максимальная мощность данной зоны зависит от геологических особенностей территории и может достигать значительных величин. Как правило, скопление движется по пути течения грунтовых вод, но с меньшей скоростью и со сменой направлений, так как сильное влияние оказывает геологическое и гидрогеологическое строение участка загрязнения, а также сезонность, вид НП, его физические и химические характеристики.

Другая форма техногенных скоплений НП — зона пленочного растекания нефтепродуктов по поверхности грунтовых вод. Здесь формируются крупные участки пленочного растекания нефтепродукта, перемещающиеся вместе с «подстилающими» их потоками грунтовых вод. Поэтому характерной чертой данной формы является практическое отсутствие ее мощности в привычном понимании. Площадь таких зон, непосредственно контактирующих с поверхностью грунтовых вод и их загрязняющих, в определенных условиях может значительно превышать площади плавающих линз.

Третья форма загрязнения — растворенные и эмульгированные нефтепродукты, находящиеся в грунтовых водах в истинно растворенном состоянии, а также НП в водной толще в виде эмульсий. Эта форма накопления загрязнений возникает при наличии плавающей линзы или зоны пленочного растекания.

В реальности схематично охарактеризованные типы загрязнения еще более сложные. Они развиваются не только по мощности, но и в разных направлениях [9]. В этой связи очень важно до начала ликвидации загрязнения качественно провести изыскания линзы НП, а также мониторинг в течение нескольких

смен сезонов, чтобы оценить колебания мощности НП, направление движения, основное место концентрации на момент извлечения. Только после выполнения последовательного исследования можно приступить к разработке и осуществлению мероприятий по ликвидации.

Под ликвидацией накопленного вреда окружающей среде понимают комплекс мероприятий организационного характера по очистке территорий или акваторий от накопленного вреда окружающей среде. Понятие «накопленный вред окружающей среде» включает в себя вред окружающей среде, возникший в результате прошлой экономической и иной деятельности, обязанности по устранению которого не были выполнены либо были выполнены не в полном объеме (ст. 1 закона от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды»).

Порядок осуществления работ по ликвидации нефтяного загрязнения регулируется Правилами организации работ по ликвидации накопленного вреда окружающей среде (постановление правительства РФ от 4 мая 2018 г. № 542 «Об утверждении Правил организации работ по ликвидации накопленного вреда окружающей среде»). Работы осуществляются исполнителем, определяемым заказчиком в соответствии с законодательством РФ о контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд.

Организация работ по ликвидации накопленного вреда согласно п. 3 постановления правительства РФ от 4 мая 2018 г. № 542 включает в себя:

- проведение необходимых обследований объекта, в том числе инженерных изысканий;
- разработку проекта работ по ликвидации накопленного вреда;

- согласование и утверждение проекта;
- проведение работ по ликвидации накопленного вреда;
- осуществление контроля и приемку проведенных работ по ликвидации накопленного вреда.

Особое внимание необходимо уделить обследованию объекта, так как специализированные документы по проведению инженерных и инженерно-экологических изысканий по определению загрязнений грунтовых вод отсутствуют. Таким образом, инженерно-экологические изыскания по нахождению НП загрязнений чаще всего проводятся в соответствии с нормативными документами по строительству, такими как СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения» и СП 11-102-97 «Инженерно-экологические изыскания для строительства».

Согласно СП 47.13330, данные виды изысканий предназначены для производства работ по капитальному строительству и не охватывают вопросы получения информации для последующей ликвидации загрязнений и создания мероприятий по защите окружающей среды, что отмечено в п. 1 СП: «Требования настоящего свода правил распространяются на выполнение инженерных изысканий для подготовки документов территориального планирования, документации по планировке территории, архитектурно-строительного проектирования, строительства и реконструкции объектов капитального строительства повышенного и нормального уровня ответственности».

Область применения СП 11-102-97 также предполагает строительную отрасль: нормативный документ устанавливает основные правила и рекомендуемые процедуры проведения инженерно-экологических изысканий для строительства.



Рис. 2. Участки проведения работ

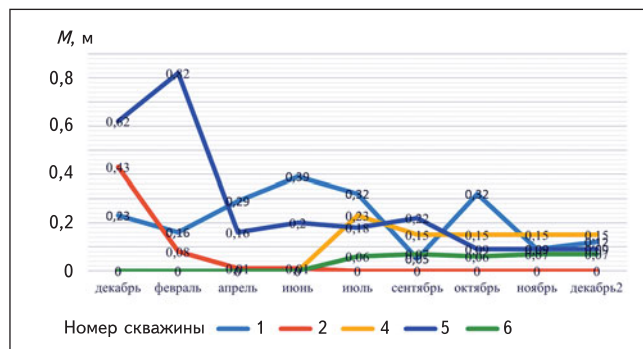


Рис. 3. Колебания мощности слоя М нефтепродуктов по месяцам

Работы по изысканиям для капитального строительства, как правило, проводят только на предмет нахождения или опровержения наличия подземных загрязнений, но линза НП подвижна, поэтому после определения наличия подвижной фазы, необходимо изучить пути миграции НП в разные временные промежутки в зависимости от различных факторов. Так, особенности зависимости подземного стока от атмосферных осадков определяются вкладом сезонных осадков и осадков текущего года, что предполагает длительность исследований. Данный факт чаще всего не предусмотрен в условиях технического задания, где временной промежуток имеет ограничения.

Таким образом, сложности при производстве работ по изысканиям на предмет ликвидации загрязнения НП подземного пространства возникают из-за отсутствия нормативных документов и рекомендаций по проведению подобных работ, которые учитывали бы специфику вида загрязнений и имели определенный подход. Вследствие недостатка нормативной базы при выполнении изысканий исполнители совершают систематические ошибки, что в свою очередь влияет на результат. Далее рассмотрим ряд факторов, влияющих на эффективность работ по инженерно-экологическим изысканиям.

Инженерно-экологические изыскания проводят за счет бюджетных средств. Как правило, заказчик готовит техническое задание, в котором устанавливает довольно сжатые сроки выполнения работ (один сезон, в теплое время года). В результате возникает вероятность получения неполной информации, что приводит в дальнейшем к неверным решениям. Например, при отборе проб грунтовых вод часто пробуривают скважину, куда погружается насос, при этом фильтр (при наличии) находится ниже подвижной части НП. Следовательно, даже при наличии слоя НП на поверхности грунтовых вод анализ проб показывает отсутствие или содержание незначительных концентраций НП. Кроме того, есть вероятность ошибки при отборе проб из скважины, до которой линза НП еще не добралась. Также в сжатые сроки не учитывается фактор колебания уровня грунтовых вод, от которого зависит мощность и подвижность линзы НП. Не стоит забывать и о человеческом факторе, когда отбор проб технически произведен некорректно.

Установить точные параметры линзы невозможно, так как она подвижна и может менять направление и мощность в зависимости от колебания уровня грунтовых вод, коэффициента фильтрации, геологических и гидрологических характеристик и т. д.

Также определение параметров линзы затрудняет значительная глубина заложения грунтовых вод, а соответственно, и линзы НП, что приводит к затратным, но не всегда эффективным усилиям. Иными словами, обязательное условие проведения исследований — отслеживание закономерности изменения линзы НП.

Еще одна причина — скорость движения НП по поверхности грунтовых вод. По своим характеристикам линза НП отличается от грунтовых вод по плотности, мощности, составу, массе и объему, ее параметры могут меняться в зависимости от времени года и коэффициента фильтрации, что замедляет движение линзы относительно грунтовых вод. Тем самым при моделировании процесса миграции подобного вида загрязнений скорость движения линзы НП нельзя приравнивать к скорости грунтовых вод. Вследствие разницы в движении линзы НП и грунтовых вод приток НП к скважине неравномерен, что затрудняет откачку загрязнения. Так, в один период в скважине наблюдается значительное количество НП, а в другой — они могут отсутствовать. Возможна и обратная тенденция: в скважине, в которой не наблюдался слой НП, по истечении некоторого времени, нефтепродукт может появиться, т. е. НП приходит к скважине не сразу, для подоб-

ных наблюдений и работ необходимо определенное количество времени.

В некоторых случаях возникает проблема, когда линза НП занимает значительные территории, часть из которых может находиться в частной собственности. Тогда необходимые изыскания и мониторинг возможно проводить только в ограниченных условиях, а исполнитель, в свою очередь, получает неполные данные. То есть в данной ситуации нет возможности исследовать всю площадь подземного загрязнения, так как доступ к ней отсутствует или ограничен.

В качестве примера подобных ситуаций приведен *рис. 2*, на котором территория потенциально-го источника загрязнения грунтовых вод выделена оранжевым цветом, доступная для проведения работ территория — красным, территория бывшей базы хранения НП, на которую доступ затруднен, показана синим цветом. Территории частного пользования не отмечены, доступ на такие территории закрыт для проведения работ по изысканиям. Финансирование на производство работ выделяется из бюджетных средств и позволяет выполнять работы только на государственных и муниципальных землях.

Из *рис. 2* видно, что доступные для работ территории фрагментарны, отмечается проблема недоступности большей части территории и, как следствие, недостаток получаемых данных по изысканиям. При проведении мониторинга на доступных участках выявлено, что в случае колебания уровня грунтовых вод в зависимости от сезонности мощность слоя НП в наблюдательных скважинах постоянно изменялась (*рис. 3*). Это объясняется тем, что при колебании уровня грунтовых вод линза НП может быть захвачена грунтом зоны аэрации,

меняя свое направление либо только достичь определенной скважины. Также приток НП к скважине непостоянен, что вызвано различными скоростями жидкостей с разной плотностью (вода и линза НП).

На исследуемом участке преобладают карстовые породы. Литология карстующихся пород определяет низкие фильтрационные и сорбционные способности по отношению к НП. Однако такие породы имеют полости и трещины, которые являются как каналами для миграции загрязнителя, так и пустотами, где происходит скопление нефтепродуктов, и в дальнейшем они выступают в виде вторичного источника загрязнения [10].

В отличие от карстовых пород механизм захвата на песчаных грунтах несколько иной. В работе [11] подробно описан эксперимент на песчаной колонне, где над уровнем воды подавался керосин, впоследствии сформировавший линзу НП на поверхности воды. Как показал эксперимент, после подъема и последующего понижения уровня воды, около 40 % керосина осталось «захвачено» песком. Таким образом, можно сделать вывод, что большую роль в процессе миграции линзы НП играют грунты зоны аэрации и учет колебания уровня грунтовых вод.

Для определения линзы НП можно использовать алгоритм выполнения инженерно-экологических изысканий, который включает в себя:

- сбор, анализ и обобщение материалов инженерно-экологических изысканий прошлых лет, опубликованных и фондовых материалов о возможных источниках загрязнения и т. д.;
- определение площади загрязнения с использованием геофизических методов, таких как геохимическая съемка [12], гравиметрический [13, 14], фазомет-

рический [15, 16] и сейсмоакустический [17, 18] методы, а также последующим бурением картировочных скважин в зависимости от диктующих условий местности и т. д.;

- выбор мест размещения и количества картировочных скважин для подтверждения наличия линзы НП в подземном горизонте [19];
- сезонный мониторинг;
- анализ полученных результатов.

Данный алгоритм позволит оценить ситуацию и получить более полную картину происходящего, а также с большей вероятностью оценить параметры линзы и пути ее миграции. В результате проведенные изыскания будут наиболее достоверными, а мероприятия по локализации и ликвидации линзы НП наиболее эффективными.

Вывод

Необходима разработка нормативных документов для осуществления работ по изысканиям с учетом особенностей подвижной фазы НП.

Документы должны содержать такие пункты, как геологические и гидрологические изыскания по нахождению НП, определение мощности слоя НП и площади загрязнения, изыскания в местах разгрузки нефтепродуктов для разработки мероприятий по дальнейшей их локализации, ликвидации и утилизации, проведение мониторинга на стадии изысканий в течение нескольких смен сезонов (не менее полутора или двух лет) и т. д.

Рассмотренные проблемы требуют обязательного решения с целью повышения качества состояния окружающей среды и экономии ресурсов, а также создания рекомендаций для подготовки соответствующих нормативных документов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бондарик Г. К. Эколого-геологическая проблема и природно-технические системы. М. : Икар, 2004. 240 с.
2. Дашко Р. Э., Петров Н. С. Проблемы загрязнения и очистки подземных вод и грунтов от нефтяных углеводородов в Санкт-Петербургском регионе // Современные проблемы гидрогеологии. Пятые толстихинские чтения : материалы науч.-метод. конф. СПб : Санкт-Петербург. горный ин-т, 1996. С. 132–134.
3. Охрана окружающей среды в России. 2014. М. : Росстат, 2014. 78 с.
4. Баревский Б. В., Баревский Л. В., Бухарин С. М. [и др.]. К проблеме локализации ликвидации нефтяных загрязнений на объектах Минобороны РФ // Геоэкология. 1997. № 5. С. 75–83.
5. Велин А. С. Особенности миграции углеводородов в грунтах зоны аэрации и подземных водах в местах расположения крупных нефтехранилищ // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2018. № 1. С. 142–147.
6. Карцев А. А., Табасаранский З. А., Суббота М. И., Могилевский Г. А. Геохимические методы поисков и разведки нефтяных и газовых месторождений. М. : Гостоптехиздат, 1954. 430 с.
7. Кесельман Г. С., Махмудбеков Э. А. Защита окружающей среды при добыче, транспорте и хранении нефти и газа. М. : Недра, 1981. 256 с.
8. Блоков И. П., Таргулян О. Ю., Усов Е. И. Накопленный вред окружающей среде: разрушения здоровья и бюджетов // GREENPEACE.RU: общественная некоммерческая неправительственная организация Greenpeace в России. 2020. URL: <https://greenpeace.ru/wp-content/uploads/2020/03/доклад-Greenpeace-объекты-накопленного-вреда-ОС-в-РФ-2020.pdf> (дата обращения: 28.12.2021).
9. Мироненко В. А., Румынин В. Г. Проблемы гидрогеоэкологии. В 3-х т. Т. 1. Теоретическое изучение и моделирование геомиграционных процессов. М. : Московский государственный горный университет, 2002. 611 с.
10. Максимович Н. Г., Мещерякова О. Ю. Нефтяное загрязнение подземных вод в карстовых районах и методы борьбы с ним // Теория и методы исследований в естественных науках : сб. материалов Международ. науч.-практ. конф. Пермь : ПГНИУ, 2016. С. 218–227.
11. Огняник Н. С., Парамонова Н. К., Брикс А. Л. [и др.]. Основы изучения загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами. Киев : А.П.Н., 2006. 278 с.
12. Бачурин Б. А., Борисов А. А. Газогеохимическое зондирование как метод контроля за развитием аварийной ситуации на БКПРУ-1 // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 1. С. 323–328.
13. Пат. РФ 2055374. Гравиметрический способ обнаружения подземных неоднородностей / А. Г. Голубков. Опубл. 27.02.1996.
14. Бычков С. Г., Симанов А. А., Хохлова В. В. Современные процедуры вычисления аномалий силы тяжести при высокоточных гравиметрических наблюдениях // Вестник Пермского университета. Геология. 2013. № 3(20). С. 61–70.
15. Анисимова И. В., Зыков Ю. Д., Мотенко Р. Г. Влияние нефтяного загрязнения на электрические и акустические свойства мерзлых пород // Геофизика. 2003. № 6. С. 59–63.
16. Гайсин Р. М., Набатов В. В. Выделение аномальных зон в подземной электроразведке методом аналитического продолжения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 6. С. 107–112. doi 10.25018/0236-1493-2018-6-0-107-112
17. Шувалов В. М. Комплексное применение методов геофизики на стадиях проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений и коммуникаций // Вестник Пермского университета. Геология. 2011. № 4. С. 46–60.
18. Романов В. В., Посеренин А. И., Дронов А. Н., Мальский К. С. Обзор геофизических методов, применимых при поиске геомеханических нарушений вблизи горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 1. С. 243–248.
19. Методические рекомендации по выявлению и оценке загрязнения подземных вод. М. : ВСЕГИНГЕО, 1990. 76 с.

REFERENCES

1. Bondarik G. K. *Ekologo-geologicheskaya problema i prirodnotekhnicheskie sistemy* [Ecological-geological problem and natural-technical systems]. Moscow, Ikar Publ. 240 p., 2004. (In Russ.).
2. Dashko R. E., Petrov N. S. Problems of pollution and purification of groundwater and soils from petroleum hydrocarbons in the St. Petersburg region. *Sovremennye problemy gidrogeologii* [Modern problems of hydrogeology]. St. Petersburg, Sankt-Peterburgskiy gornyy in-t Publ., 1996, pp. 132–134. (In Russ.).
3. *Okhrana okruzhayushchey sredy v Rossii. 2014* [Environmental protection in Russia. 2014]. Moscow, Rosstat Publ., 2014. 78 p. (In Russ.).
4. Barevskiy B. V., Borevskiy L. V., Bukharin S. M. et al. On the problem of localization of elimination of oil pollution at the facilities of the Ministry of Defense of the Russian Federation. *Geoekologiya*, 1997, no. 5, pp. 75–83. (In Russ.).
5. Velin A. S. Features of hydrocarbon migration in the soils of the aeration zone and groundwater in the locations of large oil storage facilities. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*, 2018, no. 1, pp. 142–147. (In Russ.).

6. Kartsev A. A., Tabasaranskiy Z. A., Subbota M. I., Mogilevskiy G. A. *Geokhimicheskie metody poiskov i razvedki neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy* [Geochemical methods of prospecting and exploration of oil and gas fields]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1954. 430 p. (In Russ.).
7. Kesel'man G. S., Makhmudbekov E. A. *Zashchita okruzhayushchey sredy pri dobyche, transporte i khranении nefi i gaza* [Environmental protection in oil and gas production, transportation and storage]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 256 p. (In Russ.).
8. Blokov I. P., Targulyan O. Yu., Usov E. I. Accumulated environmental damage: destruction of health and budgets. GREENPEACE.RU. Available at: [https://greenpeace.ru/wp-content/uploads/2020/03/doklad-Greenpeace-ob"ekty-nakoplenogo-vreda-OS-v-RF-2020.pdf](https://greenpeace.ru/wp-content/uploads/2020/03/doklad-Greenpeace-ob) (accessed 28.12.2021). (In Russ.).
9. Mironenko V. A., Rumynin V. G. *Problemy gidrogeologii. Teoreticheskoe izucheniye i modelirovaniye geomigratsionnykh protsessov* [Problems of hydrogeology. Theoretical study and modeling of geomigration processes]. Moscow, Moskovskiy gosudarstvennyy gornyy universitet Publ., 2002. 611 p. (In Russ.).
10. Maksimovich N. G., Meshcheryakova O. Yu. Oil pollution of groundwater in karst areas and methods of combating it. *Teoriya i metody issledovaniy v estestvennykh naukakh* [Theory and methods of research in the natural sciences]. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Perm, PGNIU Publ., 2016, pp. 218–227. (In Russ.).
11. Ognyanik N. S., Paramonova N. K., Briks A. L. et al. *Osnovy izucheniya zagryazneniya geologicheskoy sredy legkimi nefteproduktami* [Fundamentals of studying the pollution of the geological environment with light petroleum products]. Kiev, A.P.N. Publ., 2006. 278 p. (In Russ.).
12. Bachurin B. A., Borisov A. A. Gas-geochemical sounding as a method of monitoring the development of an emergency situation at BKPRU-1. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2010, no. 1, pp. 323–328. (In Russ.).
13. Patent RF 2055374. *Gravimetricheskyy sposob obnaruzheniya podzemnykh neodnorodnostey* [Gravimetric method for detecting underground inhomogeneities] / A. G. Golubkov. Publ. 27.02.1996. (In Russ.).
14. Bychkov S. G., Simanov A. A., Khokhlova V. V. Modern procedures for calculating gravity anomalies in high-precision gravimetric observations. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2013, no. 3(20), pp. 61–70. (In Russ.).
15. Anisimova I. V., Zykov Yu. D., Motenko R. G. Vliyaniye neftyanogo zagryazneniya na elektricheskie i akusticheskie svoystva merzlykh porod. *Geofizika*, 2003, no. 6, pp. 59–63. (In Russ.).
16. Gaysin R. M., Nabatov V. V. Identification of anomalous zones in underground electrical exploration by the method of analytical continuation. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2018, no. 6, pp. 107–112. (In Russ.). doi: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-107-112
17. Shuvalov V. M. Complex application of geophysics methods at the stages of design, construction and operation of engineering structures and communications. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2011, no. 4, pp. 46–60. (In Russ.).
18. Romanov V. V., Poserenin A. I., Dronov A. N., Mal'skiy K. S. Overview of geophysical methods used in the search for geomechanical disturbances near mine workings. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2016, no. 1, pp. 243–248. (In Russ.).
19. *Metodicheskie rekomendatsii po vyyavleniyu i otsenke zagryazneniya podzemnykh vod* [Methodological recommendations for the identification and assessment of groundwater pollution]. Moscow, VSEGINGEO Publ., 1990. 76 p. (In Russ.).



«УРАЛ-ПРЕСС» – КОРПОРАТИВНАЯ ПОДПИСКА СО ВСЕМИ УДОБСТВАМИ

Подписаться на журнал «Промышленное и гражданское строительство» стало проще и удобнее:

1. Скачайте подписной каталог на сайте www.ural-press.ru, в котором 20 000 российских и зарубежных изданий.
2. Отправьте заявку на подписку по факсу или электронной почте в ваше региональное подразделение «Урал-Пресс».
3. Все документы и выписанные издания курьер доставит вам в офис.

Подписка с «Урал-Пресс» – это:

- персональный менеджер • доставка в первой половине дня лично в руки •
- полный пакет отчетных документов ежемесячно • подписка с любого месяца •
- восстановление вышедших ранее изданий •

Подробная информация и контакты всех представительств «Урал-Пресс» на сайте www.ural-press.ru.

УДК 697.343:624.139

doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.38-42

Моделирование бесканальной прокладки теплопроводов в районах многолетнемерзлых грунтов

Виктор Алексеевич ПУХКАЛ, кандидат технических наук, доцент, pva1111@rambler.ru

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ),
190005 Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

Аннотация. В настоящее время в регионах с многолетнемерзлыми грунтами находит применение бесканальная прокладка подземных трубопроводов теплоснабжения в виде предварительно изолированных в заводских условиях гибких полимерных труб с тепловой изоляцией, покрытой защитным гофрированным полиэтиленовым кожухом. Приведены результаты исследования нестационарного режима теплопроводов бесканальной прокладки в районе с многолетнемерзлыми грунтами. Для исследования разработана компьютерная модель процесса сезонного оттаивания–замерзания многолетнемерзлого грунта в программном комплексе ELCUT. Выполнен расчет для временного интервала 10 лет. Определены средние за год удельные линейные тепловые потоки для подающего и обратного трубопроводов. Полученные данные сопоставлены с результатами расчета по нормативным документам. Материалы исследования подтверждают возможность определения тепловых потерь при подземной бесканальной прокладке трубопроводов двухтрубных тепловых сетей в районах многолетнемерзлых грунтов по результатам расчета стационарного режима. При этом за расчетную температуру окружающей среды принимается средняя за год температура грунта на глубине заложения оси трубопровода.

Ключевые слова: бесканальные подземные теплопроводы, многолетнемерзлые грунты, моделирование

Для цитирования: Пухкал В. А. Моделирование бесканальной прокладки теплопроводов в районах многолетнемерзлых грунтов // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 5. С. 38–42.

doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.38-42

MODELING OF CHANNEL-FREE LAYING OF HEAT PIPELINES IN AREAS OF PERMAFROST SOILS

Viktor A. PUKHKAL, pva1111@rambler.ru

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-ya Krasnoarmeyskaya ul., 4,
St. Petersburg 190005, Russian Federation

Abstract. Currently, in regions with permafrost soils, the channel-free laying of underground heat supply pipelines in the form of flexible polymer pipes pre-insulated in factory conditions with thermal insulation covered with a protective corrugated polyethylene casing is used. The results of the study of the non-stationary mode of heat pipelines of channel-free laying in an area with permafrost soils are presented. A computer model of the process of seasonal thawing–freezing of permafrost soil in the ELCUT software package has been developed for the study. The calculation is made for a time interval of 10 years. The average annual specific linear heat flows for the supply and return pipelines have been determined. The data obtained are compared with the calculation results according to regulatory documents. The research materials confirm the possibility of determining heat losses during the underground channel-free laying of pipelines of two-pipe heating networks in areas of permafrost soils based on the results of the calculation of the stationary regime. At the same time, the average annual ground temperature at the depth of the pipeline axis is taken as the calculated ambient temperature.

Keywords: channel-free underground heat pipelines, permafrost soils, modeling

For citation: Pukhkal V. A. Modeling of Channel-Free Laying of Heat Pipelines in Areas of Permafrost Soils. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2022, no. 5, pp. 38–42. (In Russ.).

doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.38-42

Введение

В районах с многолетнемерзлыми грунтами наибольшее использование получила надземная прокладка трубопроводов на высоких или низких опорах [1, 2]. Такие типы прокладок обладают рядом достоинств, например вы-

сокой надежностью, относительно невысокой стоимостью строительства, простотой эксплуатации вследствие доступности элементов сети осмотру и почти полным исключением влияния теплового воздействия трубопроводов на грунт.

Однако надземные прокладки имеют и существенные недостатки. К ним относятся:

- увеличенные потери теплоты трубопроводами, что нередко ведет к неполучению потребителями расчетного количества теплоты;

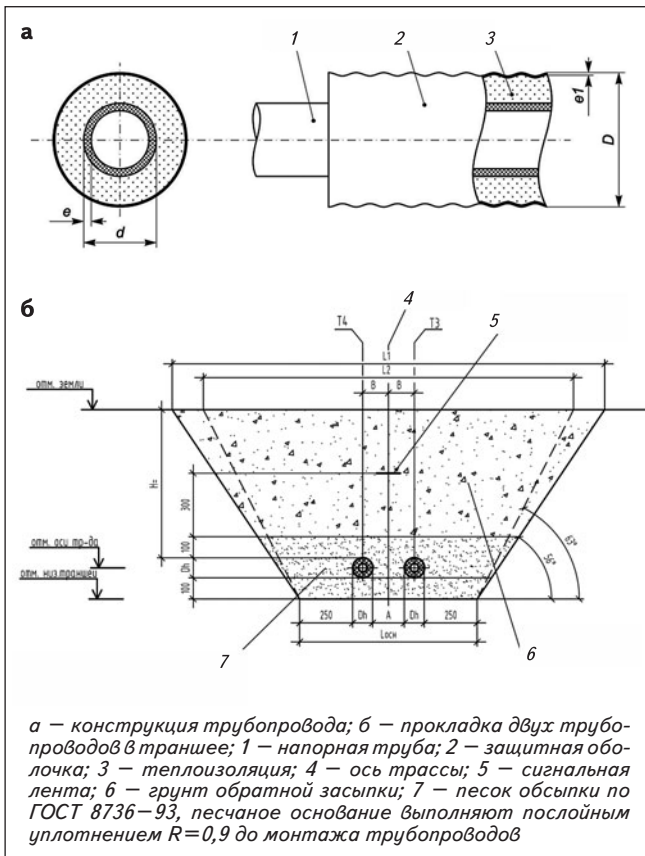


Рис. 1. Бесканальная прокладка трубопроводов системы горячего водоснабжения

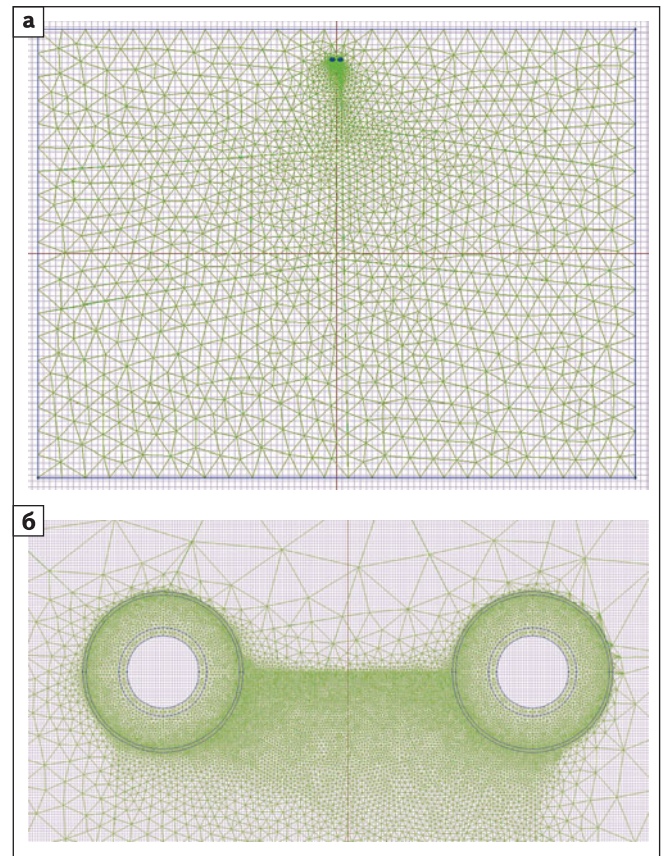


Рис. 2. Расчетная сетка массива грунта (а) и массива с трубопроводами (б)

- систематические повреждения теплоизоляционных конструкций вследствие воздействия природно-климатических факторов, механических повреждений транспортом, жителями и пр.;
- затруднения, связанные с движением транспорта и пешеходов при многочисленных пересечениях маршрутов движения с тепловыми сетями;
- необходимость организации постоянного контроля за состоянием конструкций;
- ухудшение архитектурного облика населенных пунктов.

Современные требования к благоустройству городов и поселков обусловили применение подземной прокладки инженерных коммуникаций. Для устранения теплового влияния таких трубопроводов на грунт и с целью их полной изоляции от мерзлоты устраивают вентилируемые же-

Характеристики материалов трубопровода и грунта

Показатель	Трубопровод			Грунт	
	напорная труба	тепло-изоляция	защитная оболочка	талый	мерзлый
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,38	0,032	0,43	1,3	1,8
Плотность, кг/м ³	950	65	930	1500	1000
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	2300	1470	2000	2000	2000

лезобетонные каналы. Но, как показывает опыт эксплуатации [3], образующаяся вокруг канала зона оттаявшего грунта благоприятствует притоку надмерзлотных вод, большая часть которых поступает в сами каналы. Это ведет к их затоплению, нарушению тепловой изоляции, коррозии труб и в конечном итоге к выводу из строя теплопроводов. Часто из-за осадок грунта в основании каналов возникают значительные

деформации (смещение отдельных секций), как правило, сопровождающиеся обводнением и заиливанием каналов.

Кроме того, подземная прокладка в железобетонных каналах требует значительных затрат. Поэтому возникает задача не только улучшить конструкцию подземных теплопроводов, но и удешевить их строительство.

В последние годы для бесканальной подземной прокладки

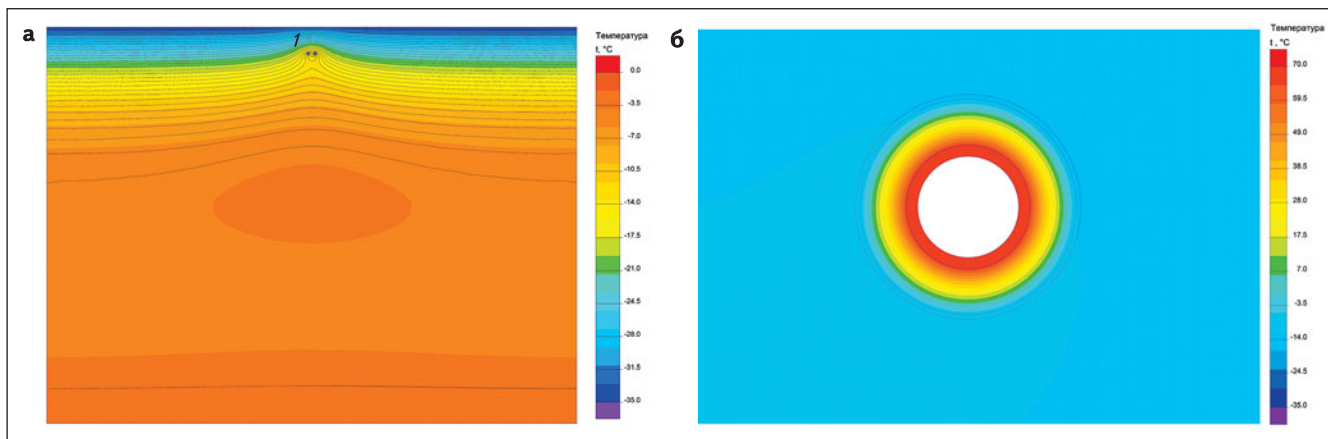


Рис. 3. Температурные поля грунта с трубопроводами (а) и подающего трубопровода (б)

трубопроводов применяют гибкие полимерные теплоизолированные трубы [4–10]. Однако вопросы их расчета при использовании в районах с многолетнемерзлыми грунтами остаются неисследованными. Например, в работе [9] отмечено, что «методика теплового расчета бесканальных теплопроводов не учитывает разнородность и нестационарность процессов переноса, наличие возможных фазовых переходов, изменение условий эксплуатации и взаимодействия теплопроводов с окружающей средой».

Цель работы — исследование нестационарного режима теплопроводов бесканальной прокладки в районе с многолетнемерзлыми грунтами и сравнение полученных данных с результатами расчета тепловых потерь по методике СП 61.13330.2012 «СНиП 41-03-2003 Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов», предполагающей расчет при стационарных условиях.

Методы и материалы исследования

Для исследования приняты полимерные армированные теплоизолированные трубы, предна-

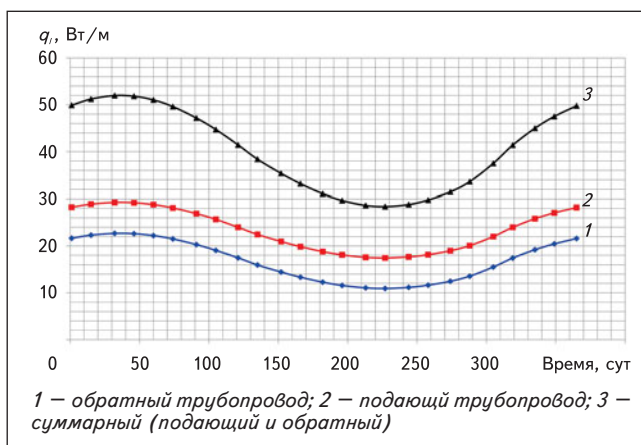


Рис. 4. Удельный линейный тепловой поток трубопроводов (10-й год эксплуатации)

значенные для систем горячего водоснабжения при бесканальной подземной прокладке [5, 6]. Трубы представляют собой многослойную конструкцию, состоящую из напорной полиэтиленовой трубы, теплоизолирующего слоя и защитной оболочки из полиэтилена. В качестве тепловой изоляции используют композицию из полужесткого озонобезопасного пенополиуретана (ППУ).

Компьютерную модель процесса сезонного оттаивания—замерзания многолетнемерзлого грунта разрабатывали в программном комплексе ELCUT, который позволяет решать плоские и осесимметричные задачи стационарной и нестационарной теплопередачи. Для расчета временной интервал составлял 10 лет.

Для моделирования принята конструкция (рис. 1) с наружным диаметром напорной трубы $d = 63$ мм, толщиной стенки $e = 5,8$ мм, наружным диаметром оболочки $D = 114,8$ мм и толщиной стенки оболочки $e_1 = 2,4$ мм. Бесканальную прокладку двух трубопроводов системы горячего водоснабжения (см. рис. 1б) моделировали с температурой теплоносителя: 70 °С — в подающем

трубопроводе (Т3), 50 °С — в обратном трубопроводе (Т4). Глубина прокладки составляла 1 м от уровня земли до оси трубопроводов.

Теплофизические характеристики материалов трубопроводов и грунта приведены в таблице.

В начальный момент времени расчета (принята условная дата 1 января 2021 г.) температурное поле в однородном грунте неизвестно. За начальное распределение температуры в грунте принимали -3 °С. Коэффициент теплоотдачи на поверхности неизменный в течение года $\alpha = 8,7$ Вт/(м²·°С). Снежный покров в расчете не учитывали.

Температура наружного воздуха принята для г. Якутска по СП 131.13330.2020 «СНиП

23-01-99* Строительная климатология» и аппроксимирована зависимостью

$$t_{\text{н}} = -8,91 + 29,25 \times \cos(((\tau - 17020800)/86400) \times (360/365)),$$

где τ — время с 1 января, сут.

Расчетная сетка в трубопроводах и массиве грунта размером $20 \times 15(h)$ м показана на *рис. 2*. Толщину массива грунта определяли по данным работ [11, 12]. Глубина 15 м и задаваемое на ней краевое условие обладают инвариантностью относительно верхних краевых условий задачи [11]. Граничные условия первого рода заданы в виде постоянной температуры -3 °С. Горизонтальный размер установлен исходя из расстояния в свету по горизонтали от тепловых сетей при их подземной прокладке до фундаментов зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах по принципу I согласно СП 124.13330.2012 «СНиП 41-02-2003 Тепловые сети».

В расчете не учитывали фазовые переходы. При промерзании грунта в естественных условиях размер зоны фазовых переходов составляет не более 5–15 см [11]. Температурные поля в массиве грунта и трубопроводах показаны на *рис. 3*.

Результаты численного моделирования потерь тепловой энергии бесканальных трубопроводов системы горячего водоснабжения в виде данных удельного линейного теплового потока за годовой период (*рис. 4*) свидетельствуют о циклическом их изменении в зависимости от температуры наружного воздуха при фиксированной температуре теплоносителей.

Среднегодовое значение удельного линейного теплового потока в подающем трубопроводе с температурой 70 °С составляет $23,45$ Вт/м, в обратном трубопроводе

с температурой 50 °С — $16,89$, суммарный — $40,34$ Вт/м.

При подземной бесканальной прокладке трубопроводов в расчетах тепловых потерь через изолированную поверхность двухтрубных тепловых сетей за расчетную температуру окружающей среды принимают среднюю за год температуру грунта на глубине заложения оси трубопровода (при расстоянии от поверхности грунта до внешней поверхности изоляции трубопроводов более $0,7$ м). Поэтому предварительно рассчитывали температурное поле грунта без трубопроводов и определяли среднюю температуру на глубине оси трубопроводов за годовой период, которая равна $9,13$ °С.

При расчете по методике СП 61.13330, учитывающей тепловое взаимодействие двух трубопроводов, получены среднегодовые значения удельного линейного теплового потока подающего трубопровода с температурой 70 °С — $23,85$ Вт/м, обратного трубопровода с температурой 50 °С — $17,20$ Вт/м; суммарный — $41,05$ Вт/м.

Расхождение между значениями, полученными при решении в программном комплексе ELCUT и по нормативной методике, составило $1,7$ %. Следовательно, оценку тепловых потерь трубопроводов тепловой сети при бесканальной прокладке можно выполнять по нормативу, однако предварительно следует оценить тепловое состояние грунта.

При прокладке трубопроводов вокруг них не образуется зона оттаивания (ореол оттаивания). Нулевая изотерма проходит в тепловой изоляции трубопроводов (*см. рис. 3*). Средняя температура поверхности оболочки подающего трубопровода на $01.01.2031$ г. равна $-11,24$ °С.

Наиболее низкая температура на поверхности оболочки (средняя по окружности) подающего и

обратного трубопроводов составляет соответственно $-14,45$ и $-15,27$ °С.

При уменьшении или увеличении глубины прокладки и толщины теплоизоляционного слоя теплопроводов температура поверхности оболочки будет меняться. В качестве нижнего допустимого значения температурной границы эксплуатации полиэтилена можно предварительно принять значение -18 или -20 °С. При температуре, ниже допустимой, полиэтилен становится хрупким, что может привести к его преждевременному выходу из строя. Поэтому необходимы дополнительные исследования механического поведения оболочки в условиях многолетнемерзлых грунтов и, как следствие, совершенствование соответствующей нормативной базы.

Вывод

В районах многолетнемерзлых грунтов применение бесканальной подземной прокладки трубопроводов в виде гибких полимерных теплоизолированных труб не приводит к образованию зоны оттаивания. Нулевая изотерма проходит в тепловой изоляции трубопроводов.

Материалы исследования подтверждают возможность определения средних за год удельных линейных тепловых потоков для подающего и обратного трубопроводов тепловой сети при подземной бесканальной прокладке в районах многолетнемерзлых грунтов по результатам расчета стационарного режима. При этом за расчетную температуру окружающей среды принимают среднюю за год температуру грунта на глубине заложения оси трубопровода.

Работа выполнена при поддержке научно-образовательного центра мирового уровня «Российская Арктика: новые материалы, технологии и методы исследования».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Справочник по строительству на вечномёрзлых грунтах. Л. : Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1977. 552 с.
2. Ястребов А. Л. Инженерные коммуникации на вечномёрзлых грунтах. Л. : Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1972. 175 с.
3. Александров Ю. А., Надеждин А. В. Опыт строительства и эксплуатации санитарно-технических коммуникаций в южной зоне распространения вечномёрзлых грунтов. Сыктывкар : Коми, 1970. 104 с.
4. Аверьянов В. К., Горшков А. С., Васильев Г. П. Повышение эффективности централизованного теплоснабжения существующего жилого фонда // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 6(71). С. 99–111.
5. Акимов М. П., Мордовской С. Д., Старостин Н. П. Воздействие подземного трубопровода на многолетнемёрзлые грунты Крайнего Севера // Вестник СВФУ. 2012. Т. 9. № 2. С. 19–23.
6. Акимов М. П., Мордовской С. Д., Старостин Н. П. Расчет толщины теплоизоляции и величины заглубления подземных полиэтиленовых трубопроводов теплоснабжения в регионах с многолетнемёрзлыми грунтами // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2020. № 11. С. 48–56. doi: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-48-56
7. Бухин В. Е. Полипропиленовые напорные трубопроводы в инженерных системах зданий. М. : АВОК-Пресс, 2010. 106 с.
8. Жевлаков Т. В., Банных Д. О. Урай переходит на современные трубы // Полимерные трубы. 2018. № 3(61). С. 70–71.
9. Половников В. Ю., Хузеев В. А. Тепловые потери бесканальных теплотрасс в условиях промерзания грунта в зоне прокладки // Химическая физика и актуальные проблемы энергетики : сб. докладов Всерос. молодежной конф. (4–6 сентября 2012 г.). Томск : ТПУ, 2012. С. 236–238.
10. Девяткин Е., Гвоздев И., Илларионов А. К расчету тепловых потерь двухтрубных тепловых сетей при бесканальной прокладке // Полимерные трубы. 2012. № 4(38). С. 52–55.
11. Веселов В. В., Беляков В. А. Теплоизолированный малозаглубленный фундамент: работа в сезоннопромерзающих грунтах и практика теплового расчета // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 8(26). С. 13–18. doi: 10.5862/МСЕ.26.2
12. Рабинович М. В., Набережный А. Д. Формирование температурного режима многолетнемёрзлых грунтов оснований зданий на территории многоэтажной застройки города Якутска // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 3. С. 70–76. doi: 10.33622/0869-7019.2019.03.70-76

REFERENCES

1. *Spravochnik po stroitel'stvu na vechnomerzlyh gruntah* [Permafrost construction guide]. Leningrad, Strojizdat Publ., 1977. 552 p. (In Russ.).
2. Jastrebov A. L. *Inzhenernye kommunikacii na vechnomerzlyh gruntah* [Engineering communications on permafrost soils]. Leningrad, Strojizdat Publ., 1972. 175 p. (In Russ.).
3. Aleksandrov Ju. A., Nadezhdin A. V. *Opyt stroitel'stva i jekspluatatsii sanitarno-tehnicheskikh kommunikacij v juzhnoj zone rasprostraneniya vechnomerzlyh gruntov* [Experience in the construction and operation of sanitary and technical communications in the southern zone of distribution of permafrost soils]. Syktyvkar, Komi Publ., 1970. 104 p. (In Russ.).
4. Averjanov V. K., Gorshkov A. S., Vasilev G. P. Improving the efficiency of district heating in the existing housing stock. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*, 2018, no. 6(71), pp. 99–111. (In Russ.).
5. Akimov M. P., Mordovskoj S. D., Starostin N. P. Impact of an underground pipeline on permafrost soils of the Far North. *Vestnik SVFU*, 2012, vol. 9, no. 2, pp. 19–23. (In Russ.).
6. Akimov M. P., Mordovskoj S. D., Starostin N. P. Calculation of thermal insulation thickness and depth of underground polyethylene heat supply pipelines in regions with permafrost soils. *Vestnik BGTU im. V. G. Shuhova*, 2020, no. 11, pp. 48–56. (In Russ.). doi: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-48-56
7. Buhin V. E. *Polipropilenyevye napornye truboprovody v inzhenernyh sistemah zdaniy* [Polypropylene pressure pipelines in engineering systems of buildings]. Moscow, AVOK-Press Publ., 2010. 106 p. (In Russ.).
8. Zhevlakov T. V., Bannyh D. O. Uray switches to modern pipes. *Polimernye trubyy*, 2018, no. 3(61), pp. 70–71. (In Russ.).
9. Polovnikov V. Ju., Huzeev V. A. Heat losses of channelless heating mains in conditions of soil freezing in the laying zone. *Himicheskaja fizika i aktual'nye problemy jenergetiki* [Chemical physics and current problems of energy]. Sbornik dokladov Vserossijskoj molodezhnoj konferencii, 4–6 Sept. 2012. Tomsk, TPU Publ., 2012, pp. 236–238. (In Russ.).
10. Devyatkin E., Gvozdev I., Illarionov A. On the calculation of heat losses of two-pipe heating networks with channelless laying. *Polimernye trubyy*, 2012, no. 4(38), pp. 52–55. (In Russ.).
11. Veselov V. V., Beljakov V. A. Thermally insulated shallow foundation: work in seasonally freezing soils and the practice of thermal calculation. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*, 2011, no. 8(26), pp. 13–18. (In Russ.). doi: 10.5862/МСЕ.26.2
12. Rabinovich M. V., Naberezhnyj A. D. Formation of the temperature regime of permafrost soils of building foundations on the territory of multi-storey buildings in the city of Yakutsk. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2019, no. 3, pp. 70–76. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2019.03.70-76

УДК 624.134:624.15

doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.43-49

Развитие и становление вибрационной техники и технологий для специальных строительных работ

Владимир Владимирович ВЕРСТОВ, академик РААСН, доктор технических наук, профессор, sp@spbgasu.ru

Антон Николаевич ГАЙДО, доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой технологии строительного производства, gaidoan@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ),
190005 Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

Аннотация. Рассмотрены вопросы погружения в грунт и извлечения элементов механизмов с применением вибрирования. Кратко показана история развития свайной вибрационной техники. Приведены основные типы и параметры вибрационных машин, а также теоретические предпосылки, способствующие развитию вибрационного метода. Проанализировано применение вибрационной техники в различных областях специальных строительных работ, преимущественно при производстве работ нулевого цикла – инженерной подготовке территорий, в том числе освоении намывных оснований, устройстве свайных фундаментов, котлованов, требующих создания ограждений и систем их крепления. Представлены современные научные разработки в области производства специальных работ в грунтах, выполняемых по таким вибрационным технологиям, как устройство ограждений котлованов из стального шпунта при его заглублении в плотные породы; погружение полимерного шпунта за счет уменьшения диссипативных потерь энергии колебаний; устройство гидроизоляции и возведение траншейных фундаментов малоэтажных зданий в виде стен в грунте посредством профилировочных элементов, заполняемых бетонной смесью; установка водонепроницаемых перемычек на акватории из стальных оболочек большого диаметра.

Ключевые слова: вибропогружатель, вибрационная технология, погружение полимерного шпунта, траншейный фундамент, виброударный режим, перемычки на акватории

Для цитирования: Верстов В. В., Гайдо А. Н. Развитие и становление вибрационной техники и технологий для специальных строительных работ // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 5. С. 43–49.
doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.43-49

DEVELOPMENT AND FORMATION OF VIBRATION EQUIPMENT AND TECHNOLOGIES FOR SPECIAL CONSTRUCTION WORKS

Vladimir V. VERSTOV, sp@spbgasu.ru

Anton N. GAIDO, gaidoan@mail.ru

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-ya Krasnoarmeyskaya ul., 4,
St. Petersburg 190005, Russian Federation

Abstract. The issues of immersion in the ground and extraction of elements of mechanisms using vibration are considered. The history of the development of pile vibration technology is briefly shown. The main types and parameters of vibration machines, as well as the main theoretical prerequisites that contribute to the development of the vibration method, are given. The use of vibration technology in various areas of special construction works, mainly in the production of zero-cycle work – engineering preparation of territories, including the development of alluvial foundations, the installation of pile foundations, deep pits that require fences and systems for their fastening – is analyzed. Modern scientific developments in the field of production of special works in soils performed using such vibration technologies, as installation of the fences of pits made of steel sheet piling when sinking it into dense rocks; immersion of polymer sheet pile by reducing dissipative energy losses, waterproofing device and construction of trench foundations of low-rise buildings in the form of slurry walls by means of profiling elements filled with a concrete mixture; installation of waterproof jumpers in the water area made of large-diameter steel shells, are presented.

Keywords: vibratory driver, vibration technology, immersion of polymer sheet piling, trench foundation, vibration shock mode, cofferdams in the water area

For citation: Verstov V. V., Gaido A. N. Development and Formation of Vibration Equipment and Technologies for Special Construction Works. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2022, no. 5, pp. 43–49. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.43-49

Введение

Многолетний опыт производ-

ства специальных работ в грунтах показал эффективность и

значительные преимущества применения вибрационного метода

погружения различных элементов для устройства свай, улучшения свойств грунта или шпунтовых ограждений. Метод позволяет повысить производительность труда почти в 2 раза, а при изготовлении ограждений котлованов значительно сократить затраты за счет возможности извлечения шпунта для его повторного применения. Эти преимущества технологий были бы невозможны без разработки теории вибрационного погружения и исследований, направленных на создание новых видов техники.

В настоящей статье рассмотрены этапы становления вибрационной техники и перспективы ее применения в современных условиях.

История развития свайной вибрационной техники

В статье [1] и в патенте Франции № 728335 от 16.11.1931 г. предлагалось использовать вибрирование для погружения в грунт свай и других подобных элементов. Однако впервые экспериментальные исследования эффективности такого рода воздействий были выполнены в нашей стране проф. Д. Д. Барканом во Всесоюзном институте оснований сооружений (ВИОС) в 1934 г. [2], который установил возможность значительного снижения сопротивления грунта при вибрации постоянной силы, требуемой для погружения (извлечения) того или иного элемента. Полученный результат объяснялся изменением механических свойств грунта при колебаниях в зоне, примыкающей к свае, шпунту, трубе. Так, в водонасыщенном песке снижение сил сопротивления происходит вследствие разжижения грунта.

В 1949 г. в ВИОС был разработан вибропогружатель БТ-5, который применялся для погружения и извлечения стального шпунта на строительстве Горь-

ковской, Камской ГЭС и других объектах [3]. По сравнению с молотами вибраторы позволяют увеличить производительность и уменьшить стоимость производства работ. БТ-5 представлял собой вибромашину монолитной конструкции, сообщающей погружаемому элементу частоту колебаний 2500 мин^{-1} с амплитудой около 2 мм.

В ходе работ было установлено, что приводной электродвигатель вибратора БТ-5 часто выходит из строя из-за значительных знакопеременных сил инерции, связанных с участием в колебаниях статорных обмоток и ротора. Кроме того, вибрирование с амплитудой 2 мм оказалось недостаточным для преодоления в определенных условиях сопротивления грунта погружению, особенно не в водонасыщенных песках.

В 1949 г. О. А. Савинов организовал во ВНИИГС научно-исследовательскую лабораторию вибраций и специальных строительных работ, в которой им и А. Я. Лускиным была предложена новая двухмассная схема устройства вибропогружателей (ВП) с подрессоренной пригрузкой, получивших марку ВПП [4]. В этих погружателях приводной электродвигатель устанавливают на подрессоренной пригрузочной плите. Параметры колебаний вибромашин типа ВПП оказались эффективными: частота колебаний 1500 мин^{-1} , амплитуда 5–10 мм. Кроме того, применение погружателей этого типа дало возможность осуществлять вибропогружение при высоких значениях удельного давления на грунт, что повысило эффективность процесса.

Такие вибропогружатели выпускались несколькими отечественными заводами и широко использовались на многих строительных объектах. В советское время погружатели ВПП-2

(В-401) поставлялись в страны Восточной Европы, где применялись на шпунтовых работах и при устройстве вибронбивных свай. Опыт работы [5] показал, что вибропогружатели типа ВПП не только эффективные, но и достаточно долговечные машины.

В 1950–1953 гг. в ЛИИЖТ под руководством Б. П. Татарникова были разработаны тяжелые низкочастотные вибропогружатели ВП-1, ВП-3, НВП-56 [6], которые предназначались для погружения в грунт на глубину 30–35 м железобетонных оболочек диаметром до 3 м и массой 80–100 т. Эти вибраторы сообщали погружаемой конструкции частоту колебаний 400 мин^{-1} при амплитуде 10–30 мм. Их практическое использование позволило в мостостроении отказаться от кессонных фундаментов опор мостов и заменить их сборными железобетонными оболочками. Многие мостовые переходы в нашей стране, а также в Китае сооружались с применением вибропогружателей Б. П. Татарникова [7]. Вибропогружатель ВП-1 был куплен Японией, успешно использовался в этой стране и послужил прототипом для производства подобных машин.

Распространению мощных ВП в транспортном строительстве способствовали работы ЦНИИС, выполненные под руководством А. С. Головачева [8], в том числе и по созданию вибромашин с регулируемыми параметрами.

В области теоретических исследований причину успешного применения вибрирования отечественные ученые искали не только в изменении свойств грунта, а и в эффективности преодоления его сопротивления при вибрационном воздействии. Так, Ю. И. Неймарк [9] объяснял уменьшение бокового сопротивления грунта явлением линеаризации или «переходом» сухого трения в вязкое. В работе И. И. Блехма-

на и Г. Ю. Джанелидзе [10] было введено понятие эффективного коэффициента трения, т. е. изменения физических свойств контактной зоны соприкасающихся тел.

Итоговая характеристика основополагающих работ отечественных ученых и специалистов в области свайной вибротехники содержится в труде О. А. Савинова [11]. Вопросы развития в нашей стране техники и технологии для свайных и буровых работ в период 1970–1980-х гг. представлены в книге [12], авторы которой являются учениками вибротехнической школы проф. О. А. Савинова. Ими было установлено, что физические процессы, происходящие при вибрационном погружении, зависят от действующих динамических сил и разновидности грунтов. Например, при слабом динамическом воздействии эффект вибрирования определяется в основном изменением напряженного состояния грунта около погружаемого элемента. При сильных воздействиях происходит разрушение структуры грунта, который приобретает свойства вязкой среды, что снижает его сопротивление погружению.

Следует отметить, что при погружении в слабые водонасыщенные грунты возникает знакопеременное гидродинамическое давление под острием элемента. Оно приводит к разуплотнению структуры грунта и его разжижению, а также к снижению сопротивления погружения элемента преимущественно по боковой поверхности. В дальнейшем оно происходит под действием веса погружаемой системы.

В то же время при погружении элемента в маловлажные грунты эффективность процесса определяется параметрами удара его торца о грунт, который при этом уплотняется и разрушается, что приводит к снижению преимуще-

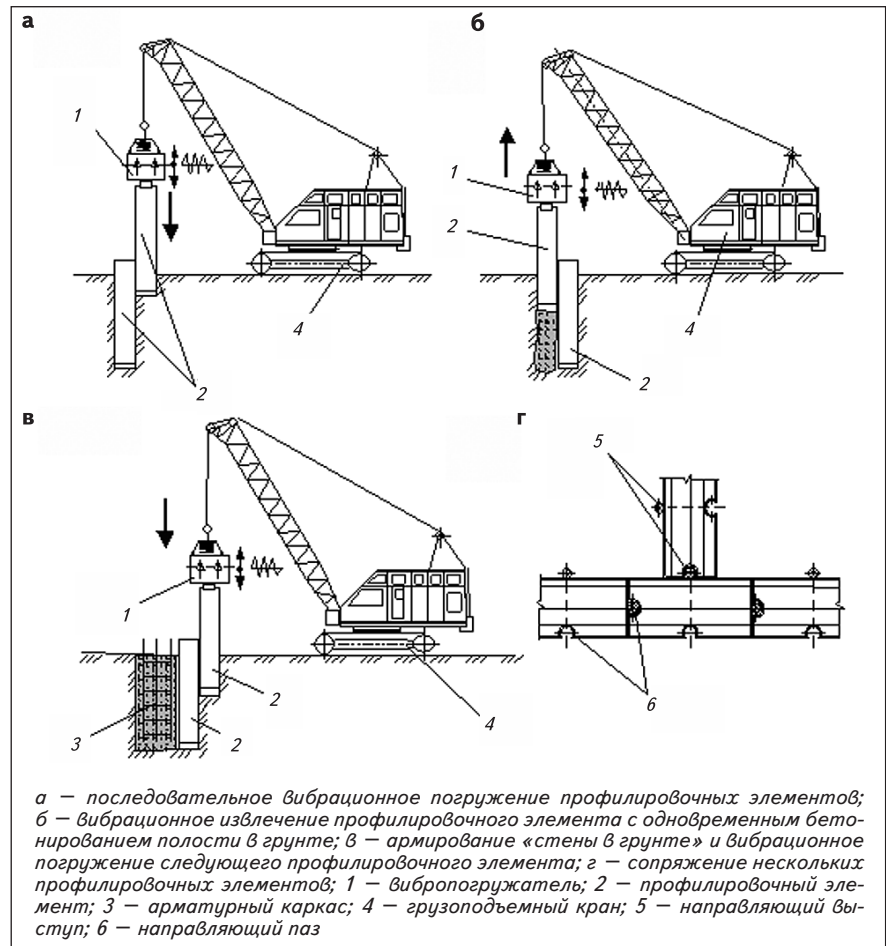


Рис. 1. Технологическая схема производства работ при устройстве несущей-ограждающей конструкции способом «стена в грунте» без выемки грунта

ственно лобового сопротивления [12].

Результаты своих исследований и разработок российские (советские) ученые и инженеры вибротехники широко и детально освещали в технической литературе, которая была доступна специалистам многих стран. Благодаря этому в начале 1960-х гг. зарубежные фирмы стали выпускать вибропогружатели различных параметров. Наиболее крупными изготовителями являются фирмы Германии, Нидерландов, Японии, Китая, Турции, Франции, Италии, США, Финляндии, Англии [13–15]. Вкладом зарубежных специалистов в развитие свайной вибротехники явилась замена в большей части ВП приводных электродвигателей на ги-

дромоторы, а также отказ от механических наголовников и переход на гидравлические захваты. Заметим, что параметры колебаний зарубежной вибротехники в основном заимствованы у российских (советских) вибротехнических средств соответствующего назначения. Кроме того, широкое использование гидравлического привода позволило повысить надежность вибротехники, а также сократить затраты труда и времени на вспомогательные операции.

Современные научные разработки в области вибрационной технологии

В настоящее время известны два российских завода, которые производят вибрационную тех-

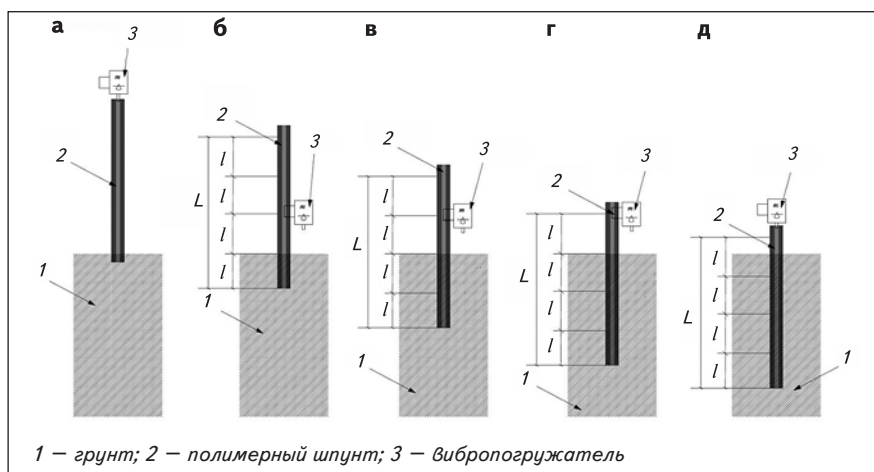


Рис. 2. Последовательность (а–д) погружения полимерного шпунта в грунт

нику. Это Охтинский завод строительных машин и Люберецкий завод мостостроительного оборудования. Причем первый из них специализируется на производстве высокочастотных ВП, эффективных для погружения шпунта и стальных труб, а второй выпускает низкочастотные машины для устройства опор из железобетонных оболочек высокой несущей способности.

В связи с большим количеством выпускаемых ВП вибрационные технологии по причине их эффективности широко используются в мировой практике при производстве специальных работ в грунтах.

На кафедре технологии строительного производства СПбГАСУ под руководством проф. В. В. Верстова с 1997 г. по настоящее время выполнен ряд исследований по применению вибрационной техники при производстве различных специальных работ в грунтах.

За период с 2003 по 2010 гг. В. В. Верстовым, Г. А. Беловым, В. В. Латутой разработана технология устройства заглубленной части малоэтажных зданий (непрерывные траншейные фундаменты) с использованием навесного сменного оборудования к стреловому самоходному крану

(рис. 1) [16]. Экспериментально обоснованы вибрационные параметры, обеспечивающие погружение в грунт профилировочного элемента с учетом лобового и бокового сопротивления грунта, трения в замках, а также эффективное истечение бетонной смеси из профилировочного элемента и заполнение ею полости в грунте при его извлечении. Таким образом обеспечивают сплошность формируемой бетонной стены и минимальные динамические воздействия на грунт основания. Выполненные расчеты и апробация предложенной технологии показали, что ее применение позволяет уменьшить стоимость работ нулевого цикла (прямые затраты) на 28 % и снизить трудоемкость работ на 42 %. Новое технологическое решение защищено патентом РФ на изобретение № 2173373.

В развитие этого способа экспериментально и теоретически обоснованы параметры технологии устройства гидроизолированной подземной части малоэтажных зданий с использованием составных профилировочных блоков, погружаемых в грунт вибрированием. Это обеспечивает эффективное преодоление сил бокового трения грунта и уплотнение бетона с достижением

прочности при сжатии $R = 20...30$ МПа и компонентов гидроизоляционного экрана с R до 40 МПа (патент РФ на изобретение № 2295005).

В 2012 г. В. В. Верстовым и Е. Н. Филипповым выполнены экспериментальные исследования и определены параметры эффективного вибрационного способа погружения полимерного шпунта. Установлено, что полимерный шпунт с точки зрения внутреннего рассеяния энергии в материале при колебаниях обладает большим коэффициентом поглощения, чем стальной, в среднем в 2,4 раза [17]. Доказано, что при погружении полимерного шпунта с целью повышения эффективности процесса возникает необходимость уменьшить диссипативные потери энергии колебаний в элементе и повысить производительность труда за счет снижения точки приложения источника колебаний с определенным шагом. Это обеспечит протекание режима вибраций в области эффективных значений логарифмического декремента затухания свободных колебаний шпунта. Данный режим реализуется посредством ВП, оснащенного боковым захватом и устанавливаемого на рукояти экскаватора.

Выполненные исследования позволили разработать технологию погружения шпунта, этапы которой представлены на рис. 2, а ее новизна подтверждена патентом РФ № 2012101892.

На рис. 2а вибропогружатель заглубляет полимерный шпунт на некоторую глубину, при этом происходит устойчивая фиксация элемента в толще грунта. Для последовательного уменьшения степени демпфирования упругих колебаний в теле шпунта и для повышения скорости его погружения передачу колебаний осуществляют при таких точках закрепления ВП, которые обеспе-

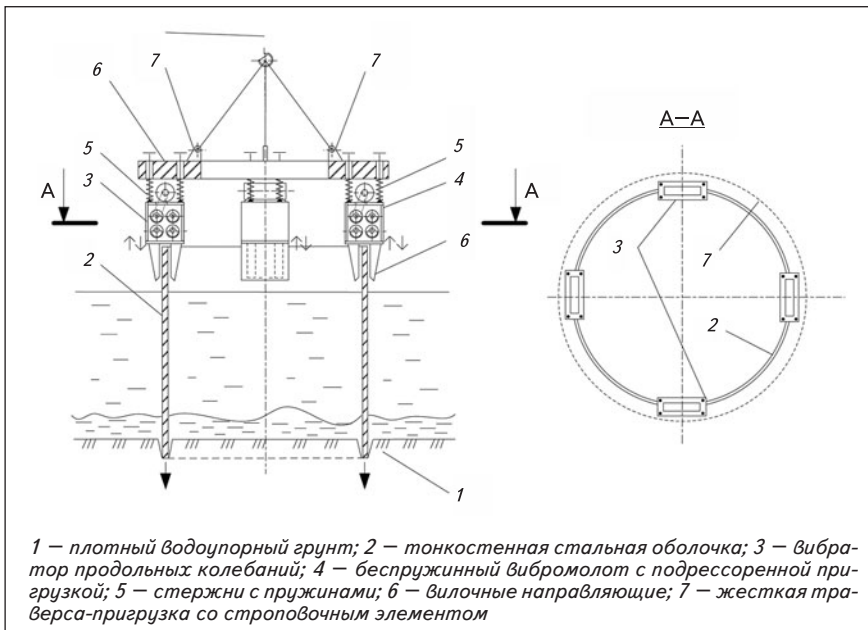


Рис. 3. Реализация виброударного способа заглубления тонкостенной стальной оболочки большого диаметра

чивают снижение потери энергии на внутреннее трение в материале погружаемого элемента (см. рис. 2б–г). Погружение шпунта до проектной отметки с обеспечением технического эффекта, достигнутого на предыдущих этапах, показано на рис. 2д.

В 2014 г. для заглубления стального шпунта в плотные слои грунта авторами статьи решена техническая проблема, заключающаяся в исключении деформаций шпунта в ходе работ [18, 19]. Для этого на основании экспериментальных и теоретических исследований разработана новая технология (патент РФ № 2535860) погружения в двустадийном режиме. В пределах верхней толщи слабых грунтов шпунт погружают с частотой гармонических колебаний 1000–2500 мин⁻¹ и амплитудой 10–20 мм, обеспечивающих максимальную скорость и минимальные динамические воздействия на окружающий массив грунта. При достижении шпунтом слоя плотного водоупорного грунта режим работы ВП переводят на низкочастотный виброударный режим с частотой колеба-

ний не менее 420 мин⁻¹ при высоте подскока ударной массы 20–40 мм. Отношение массы ВП к его вынуждающей силе выдерживают равным 0,4, что обеспечивает разрушение монолитной массы грунта под торцом шпунта при его циклическом нагружении.

Для устройства перемычек на акватории авторами статьи предложен способ, позволяющий обеспечить устойчивость и водонепроницаемость при заглублении в плотный грунт дна стальных оболочек высотой 15–16 м, диаметром 16 м при толщине стенки 8–10 мм.

На основании выполненных исследований установлена сравнительная эффективность виброударных режимов погружения, реализованная посредством свободной установки беспружинных вибромолотов на торце оболочки через вилочный наголовник (рис. 3). Предлагаемая технология закреплена патентом РФ на изобретение № 2014137366. Ее суть заключается в том, что после установки оболочек на дно акватории в створе возводимого сооружения их заглубление про-

изводят в виброударном низкочастотном режиме с подскоком ударной массы. Вибромолоты с подрессоренной пригрузкой в виде стержней с пружинами соединяют с жесткой траверсой, которую за строповочные элементы монтируют на крюк грузоподъемного крана. Таким образом достигается дополнительная статическая нагрузка на плотный водоупорный грунт и устойчивый режим работы беспружинных вибромолотов в режиме один удар на один оборот валов дебалансов.

Выводы

1. Проведенные исследования показали, что применение вибрационной техники и технологий для специальных строительных работ позволяет им успешно конкурировать с другими технологическими средствами. Причем методологические основы, заложенные российскими учеными, позволили сделать возможным применение вибрационной техники практически в любых областях специализированных работ, в том числе и при производстве работ нулевого цикла. Продолжателями этих подходов являются специалисты кафедры технологии строительного производства СПбГАСУ.

2. Средствами вибрационной техники решаются сложные технические задачи с применением механизмов общего назначения (краны, буровые установки, экскаваторы), простых вспомогательных устройств (опорные рамы, лебедки и т. п.). Простое оборудование при несложных приемах организации производства работ за счет вибрирования становится конкурентоспособным по сравнению с достаточно сложными традиционными установками, а в ряде случаев по своим показателям (производительность труда, стоимость) и превосходят их.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Штаерман Ю. Я., Добровольский К. Н. О погружении и выдергивании свай вибрированием // Строительная промышленность. 1935. № 5.
2. Баркан Д. Д. О применении вынужденных колебаний в свайных работах // Строительная промышленность. 1935. № 8.
3. Баркан Д. Д. Виброметод в строительстве. М. : Госстройиздат, 1959. 314 с.
4. Савинов О. А., Лускин А. Я., Цейтлин М. Г., Плеханова С. В. Свайные вибропогружатели с подрессоренной пригрузкой. Л.; М. : Госстройиздат, 1954. 126 с.
5. Савинов О. А., Лускин А. Я. Вибрационный метод погружения свай и его применение в строительстве. Л.; М. : Госстройиздат, 1960. 250 с.
6. Татарников Б. П. Низкочастотный (резонансный) вибратор для погружения в грунт тонкостенных железобетонных цилиндров. Л. : ЛИИЖТ, 1959. 14 с.
7. Силин К. С., Глотов Н. М., Грецов А. П. [и др.]. Фундаменты опор из сборных железобетонных оболочек. М. : Трансжелдориздат, 1958. 198 с.
8. Головачев А. С. Исследование вибрационного и виброударного погружения свай. М. : Транспорт, 1968. 180 с.
9. Неймарк Ю. И. Теория вибрационного погружения и вибровыдергивания // Инженерный сборник АН СССР. 1953. Т. XVI. С. 13–48.
10. Блехман И. И., Джанелидзе Г. Ю. Об эффективных коэффициентах трения при вибрациях // Известия АН СССР. 1958. № 7. С. 98–101.
11. Савинов О. А. Динамические проблемы строительной техники. СПб : ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1993. 177 с.
12. Цейтлин М. Г., Верстов В. В., Азбель Г. Г. Вибрационная техника и технология в свайных и буровых работах. Л. : Стройиздат, 1987. 260 с.
13. Comodromos E. M., Papadopoulou M. C., Konstantinidis G. K. Effects on adjacent buildings from diaphragm wall installation [Воздействие от устройства стены в грунте на соседние здания] // Proc. of the 18th International Conference on soil mechanics and Geotechnical Engineering. Paris, 2013. Pp. 106–121.
14. Zhang Y., Ma X. Calculation and time effect of bearing capacity of large diameter driven steel pipe pile in coral reef [Расчет и влияние времени на несущую способность свай из стальных труб большого диаметра в морских отложениях] // Journal of Xi'an University of Architecture and Technology. 2020. Vol. 52. Iss. 5. Pp. 725–729. doi: 10.15986/j.1006-7930.2020.05.015
15. Westermann K., Meier L., Pitteloud J. Excavation pit and foundation of a research center [Разработка котлована для устройства фундамента исследовательского центра] // Bautechnik. 2020. Vol. 97. Iss. 12. Pp. 878–885. doi: 10.1002/bate.202000062
16. Верстов В. В., Белов Г. А. Исследование параметров процессов возведения заглубленной части малоэтажных зданий по вибрационной технологии // Вестник гражданских инженеров. 2004. № 1(1). С. 83–91.
17. Verstov V. V., Filippov E. N. Charakteristik des Einbringens von Holymerspundbohlen in den Bodenim Vibrations verfahren [Характеристики вибрационного погружения полимерного шпунта в грунт] // Bauingenieur. 2013. Vol. 88. Pp. 533–539.
18. Gajdo A. N., Verstov V. V., Judina A. F. Comparative efficiency investigation of various types of dynamic influences on the dipped pile [Сравнение различных типов динамического воздействия при погружении свай] // World Applied Sciences Journal. 2013. Vol. 23. No. 6. Pp. 817–822. doi: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.06.13109
19. Yudina A. F., Verstov V. V. Control and reduction of dynamic disturbances during vibratory driving of sheet pile into soil [Контроль и снижение динамических воздействий при вибрационном погружении шпунта в грунт] // Mechanics and Foundation Engineering. 2017. Vol. 54. Iss. 1. Pp. 56–59.
20. [Vibration method of pile immersion and its application in construction]. Leningrad, Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1960. 250 p. (In Russ.).
21. Tatarsnikov B. P. Nizkochastotnyy (rezonansnyy) vibrator dlya pogruzheniya v grunt tonkostennykh zhelezobetonnnykh tsilindrov [Low-frequency (resonant) vibrator for immersion of thin-walled reinforced concrete cylinders into the ground]. Leningrad, LIIZhT Publ., 1959. 14 p. (In Russ.).
22. Silin K. S., Glotov N. M., Gretsov A. P. et al. Fundamenty opor iz sbornnykh zhelezobetonnnykh obolochek [Foundations of supports made of precast reinforced concrete shell]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1958. 198 p. (In Russ.).
23. Golovachev A. S. Issledovanie vibratsionnogo i vibroudarngogo pogruzheniya svay [Investigation of vibra-

REFERENCES

1. Shtaerman Yu.Ya., Dobvol'skiy K. N. About sinking and pulling out piles by vibrating. *Stroitel'naya promyshlennost'*, 1935, no. 5. (In Russ.).
2. Barkan D. D. On the use of forced vibrations in pile work. *Stroitel'naya promyshlennost'*, 1935, no. 8. (In Russ.).
3. Barkan D. D. *Vibrometod v stroitel'stve* [Vibromethod in construction]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1959. 314 p. (In Russ.).
4. Savinov O. A., Luskin A. Ya., Tseytlin M. G., Plekhanova S. V. *Svaynye vibropogruzhateli s podressorennoy prigruzkoy* [Pile vibratory loaders with sprung loading]. Leningrad, Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1954. 126 p. (In Russ.).
5. Savinov O. A., Luskin A. Ya. *Vibratsionnyy metod pogruzheniya svay i ego primeneniye v stroitel'stve*

- tion and vibration impact immersion of piles]. Moscow, Transport Publ., 1968. 180 p. (In Russ.).
9. Neymark Yu. I. Theory of vibration immersion and vibration pulling. *Inzhenernyy sbornik AN SSSR*, 1953, vol. XVI, pp. 13–48. (In Russ.).
 10. Blekhman I. I., Dzhanelidze G. Yu. On effective friction coefficients for vibrations. *Izvestiya AN SSSR*, 1958, no. 7, pp. 98–101. (In Russ.).
 11. Savinov O. A. *Dinamicheskie problemy stroitel'noy tekhniki* [Dynamic problems of construction machinery]. St. Petersburg, VNIG im. B. E. Vedeneeva Publ., 1993. 177 p. (In Russ.).
 12. Tseytlin M. G., Verstov V. V., Azbel' G. G. *Vibratsionnaya tekhnika i tekhnologiya v svaynykh i burovnykh rabotakh* [Vibration equipment and technology in pile and drilling operations]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1987. 260 p. (In Russ.).
 13. Comodromos E. M., Papadopoulou M. C., Konstantinidis G. K. Effects on adjacent buildings from diaphragm wall installation. *Proc. of the 18th International Conference on soil mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, 2013, pp. 106–121.
 14. Zhang Y., Ma X. Calculation and time effect of bearing capacity of large diameter driven steel pipe pile in coral reef. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology*, 2020, vol. 52, iss. 5, pp. 725–729. doi: 10.15986/j.1006-7930.2020.05.015
 15. Westermann K., Meier L., Pitteloud J. Excavation pit and foundation of a research center. *Bautechnik*, 2020, vol. 97, iss. 12, pp. 878–885. doi: 10.1002/bate.202000062
 16. Verstov V. V., Belov G. A. Investigation of the parameters of the processes of construction of the buried part of low-rise buildings using vibration technology. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2004, no. 1 (1), pp. 83–91. (In Russ.).
 17. Verstov V. V., Filippov E. N. Charakteristik des Einbringens von Holymerspundbohlen in den Bodenim Vibrations verfahren. *Bauingenieur*, 2013, vol. 88, pp. 533–539.
 18. Gajdo A. N., Verstov V. V., Judina A. F. Comparative efficiency investigation of various types of dynamic influences on the dipped pile. *World Applied Sciences Journal*, 2013, vol. 23, no. 6, pp. 817–822. doi: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.06.13109
 19. Yudina A. F., Verstov V. V. Control and reduction of dynamic disturbances during vibratory driving of sheet pile into soil. *Mechanics and Foundation Engineering*, 2017, vol. 54, iss. 1, pp. 56–59. ■

ПОЗДРАВЛЕНИЕ В. Л. МОНДРУСУ



Редколлегия и редакция журнала «Промышленное и гражданское строительство» сердечно поздравляют с 65-летием со дня рождения члена редколлегии журнала Владимира Львовича МОНДРУСА, доктора технических наук, профессора, члена-корреспондента РААСН, заведующего кафедрой строительной и теоретической механики НИУ МГСУ.

После окончания с отличием Московского института инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии с присвоением квалификации «инженер-механик» В. Л. Мондрус служил в рядах Вооруженных Сил СССР на различных офицерских должностях.

В 1989 г. защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Строительная механика», а в 1995 г. – диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

В НИУ МГСУ Владимир Львович прошел путь от ассистента до заведующего кафедрой строительной и теоретической механики. Его педагогический стаж составляет 33 года.

В. Л. Мондрусом опубликовано 175 работ. Он является автором целого ряда учебно-методических комплексов, рабочих программ, методических указаний и учебных пособий, членом редколлегий журналов, входящих в перечень ВАК. Выступал с лекциями в зарубежных университетах.

Под руководством В. Л. Мондруса успешно защитили кандидатские диссертации 13 аспирантов. Основная тематика подготовленных работ связана с надежностью зданий и сооружений, а также с динамическими воздействиями на конструкции, в том числе и их защитой от динамических воздействий, включая сейсмические. В большинстве диссертаций применяется вероятностный подход к решению задач, используются современные программные комплексы.

В разные годы возглавлял диссертационные советы, был председателем экспертного совета ВАК при Минобрнауки России по строительству и архитектуре. Является членом ученых советов НИУ МГСУ и Института строительства и архитектуры НИУ МГСУ, членом президиума научно-технического совета НИУ МГСУ, членом бюро Отделения строительных наук РААСН, входит в состав научных советов РААСН по цифровым технологиям в строительстве и архитектуре и по сейсмологии и сейсмостойкому строительству. Награжден почетными медалями МГСУ «За заслуги в строительном образовании и науке» I и II степени.

От всей души желаем уважаемому Владимиру Львовичу доброго здоровья, благополучия, творческих успехов в деле развития строительной науки и образования.

УДК 614.841.3:622.691.4(-21)

doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.50-54

Расчетные величины пожарного риска при авариях на наружных газопроводах

Александр Сергеевич ГЛУХАНОВ, кандидат технических наук, доцент, promo19_78@mail.ru

Виталий Васильевич ЦАПЛИН, кандидат военных наук, доцент, зав. кафедрой техносферной безопасности, vtzaplin@yandex.ru

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ),
190005 Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

Аннотация. Рассмотрен подход к определению значения условной вероятности поражения человека, находящегося в определенной точке селитебной территории, в результате развития пожароопасных ситуаций на сетях газораспределения, связанных с их разрушением и последующим воспламенением газа. На основе анализа причин возникновения аварий и факторов, определяющих их исход, а также учитывая особенности технологических процессов транспортировки природного газа, выделены типовые сценарии аварии. Для каждого сценария установлены значения вероятностей возникновения аварийных ситуаций. Предлагаемый подход позволяет более точно определить значения риска травмирования и гибели людей в результате аварий на наружных газопроводах, расположенных на территории населенных пунктов. Сделан вывод о том, что если расчетное значение риска аварий на газопроводе превышает значение, установленное нормативными документами, то в проекте должны быть дополнительно предусмотрены меры по повышению безопасности газораспределительных сетей.

Ключевые слова: авария на наружном газопроводе, пожарный риск, истечение газа, селитебная территория, вероятность поражения человека, газораспределительные сети

Для цитирования: Глуханов А. С., Цаплин В. В. Расчетные величины пожарного риска при авариях на наружных газопроводах // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 5. С. 50–54.
doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.50-54

CALCULATED VALUES OF FIRE RISK IN CASE OF ACCIDENTS ON EXTERNAL GAS PIPELINES

Alexander S. GLUKHANOV, promo19_78@mail.ru

Vitaliy V. TSAPLIN, vtzaplin@yandex.ru

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-ya Krasnoarmeyskaya ul., 4,
St. Petersburg 190005, Russian Federation

Abstract. An approach to determining the value of the conditional probability of human injury located at a certain point of the residential territory as a result of the development of fire-hazardous situations on gas distribution networks associated with their destruction and subsequent ignition of gas is considered. Based on the analysis of the causes of accidents and the factors that determine their outcome, taking into account the peculiarities of the technological processes of natural gas transportation, typical accident scenarios are identified. For each scenario, the values of the probabilities of occurrence of emergency situations are determined. The approach proposed in the article makes it possible to more accurately determine the values of the risk of injury and death of people as a result of accidents on external gas pipelines located on the territory of settlements. It is concluded that if the calculated value of the risk of accidents on the gas pipeline exceeds the value established by regulatory documents, then the project should additionally provide for measures to improve the safety of gas distribution networks.

Keywords: accident on an external gas pipeline, fire risk, gas outflow, residential area, probability of human injury, gas distribution networks

For citation: Glukhanov A. S., Tsaplin V. V. Calculated Values of Fire Risk in Case of Accidents on External Gas Pipelines. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2022, no. 5, pp. 50–54. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.50-54

Введение

Доступ к энергетическим ресурсам — важный аспект экономического развития регионов России. Для его обеспечения необходимо подключение зданий и сооружений к сетям газоснабжения.

Газификация регионов РФ включена в Федеральную целевую программу, направленную на увеличение объема строящихся газопроводов. Природный газ — один из самых экономичных видов топлива, а с экологической точки зрения — это самый чистый вид

ископаемого топлива. Вместе с тем системы газоснабжения весьма опасные производственные объекты. При авариях на газопроводах, расположенных на территории населенных пунктов, может произойти взрыв газовоздушной смеси, способный привести к разрушению зданий и гибели людей.

Постановка задачи

Согласно закону от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной

безопасности» (далее – Технический регламент) на этапе проектирования систем газоснабжения должен выполняться расчет пожарных рисков для оценки воздействия поражающих факторов на людей, здания и сооружения, технологическое оборудование. По результатам расчета пожарного риска принимаются эффективные меры, направленные на уменьшение вероятности возникновения аварий на газопроводах.

Однако возникает проблема. Существует множество методик для определения численных значений различных факторов аварийных ситуаций на газопроводе (величина ударной волны, интенсивность теплового излучения) в зависимости от удаленности от места возникновения аварии. При оценке воздействия этих факторов на человека не совсем понятен аппарат определения численных значений последствия данных воздействий [1–9]. В качестве основного нормативного документа, используемого для оценки пожарных рисков, выступает «Методика определения расчетных значений пожарного риска на производственных объектах» [10].

Требованиями, изложенными в Техническом регламенте, определено значение пожарного риска, которое не должно превышать одну десяти-миллионную в год. В случае превышения данного значения необходимы дополнительные мероприятия по защите проектируемого объекта и находящегося вблизи людей согласно постановлению правительства Российской Федерации от 31 марта 2009 г. № 272 «О порядке проведения расчетов по оценке пожарного риска». Из данного документа следует, что пожарный риск $P(a)$ (год^{-1}) в определенной точке (a), как на территории объекта, так и в селитебной зоне вблизи объекта, определяется по формуле [8, 10, 11]

$$P(a) = \sum_{j=1}^J Q_{dj}(a) Q_j, \quad (1)$$

где J – возможное число реализаций пожароопасных ситуаций; $Q_{dj}(a)$ – условная вероятность поражения человека в определенной точке территории (a) в результате реализации j -го сценария развития пожароопасных ситуаций, отвечающего определенному инициирующему аварии событию; Q_j – частота реализации в течение года j -го сценария развития пожароопасных ситуаций, год^{-1} .

Если с определением Q_j не возникает проблем, то нахождение $Q_{dj}(a)$ носит весьма неоднозначный характер. Довольно часто проектировщики прибе-

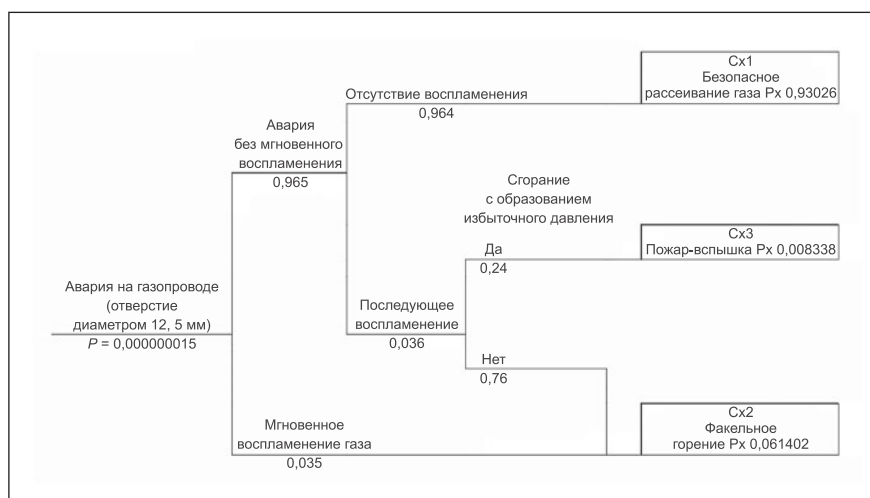


Рис. 1. «Дерево» сценария, инициированного истечением газа из отверстия диаметром 12,5 мм

гают к подгонке вычисленных значений пожарного риска на объекте проектирования, чтобы избежать необходимости выполнения дополнительных мероприятий по повышению безопасности проектируемого объекта [1–8, 12].

Цель работы – определение значения условной вероятности поражения человека, находящегося в некоторой точке селитебной территории, в результате аварии на сети газораспределения и реализации любого сценария развития пожароопасной ситуации.

Определение пожарных рисков угрозы жизни и здоровью людей

Проектируемые сети газораспределения относятся к категории объектов повышенного риска по взрывопожароопасности. Нормативными документами определено множество возможных ситуаций развития аварий. Наиболее вероятные из них – образование ударной волны, поражение осколками от трубы газопровода и фрагментов грунта, а также непосредственно термическое воздействие от горения высвободившегося газа.

Газопроводы со средним давлением наиболее часто используются для подачи газа в населенных пунктах к различным производственным потребителям, а также к пунктам редуцирования газа, от которых предусматривается газоснабжение потребителей в административных, общественных и жилых зданиях. В качестве примера в статье рассмотрена авария на газопроводе из полиэтиленовых труб среднего давления со следующими параметрами: диаметр труб – 500 мм, давление в газопроводе – 0,25 МПа, расход газа – 27400 м³/ч, общая протяженность газопровода – 354 м.

При определении потенциального воздействия по формуле (1) от поражающих факторов аварии

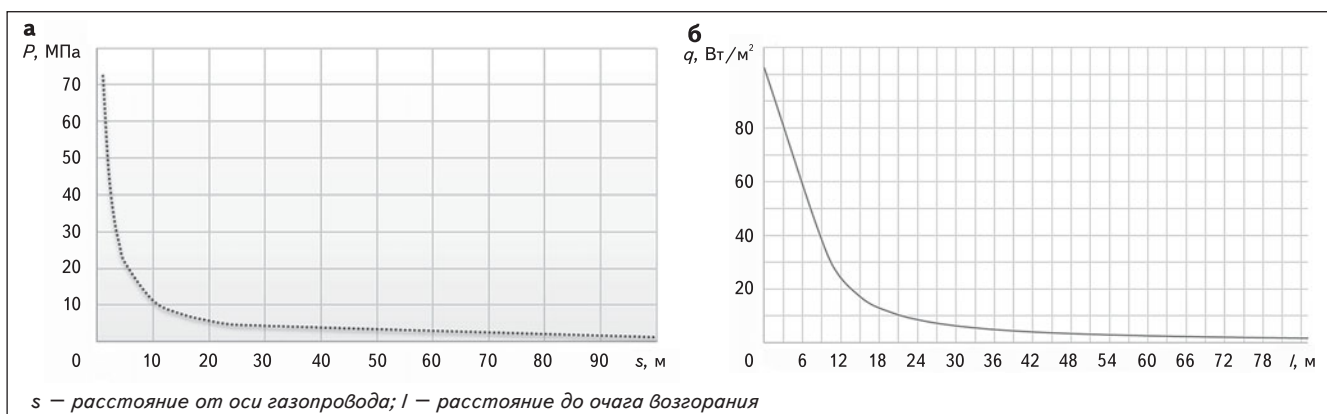


Рис. 2. Зависимость давления P во фронте ударной волны (а) и интенсивности теплового излучения q (б) от расстояния до объекта возгорания при аварии на газопроводе среднего давления

на сетях газораспределения принято строить логические «деревья» групп сценариев. Одна из реализаций такого «дерева» для газопровода среднего давления приведена на рис. 1.

Выражение для определения массового расхода истечения газа из наружного газопровода имеет следующий вид:

$$G = A_{hol} \mu \sqrt{P_v \rho_v \gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}}, \quad (2)$$

где A_{hol} – площадь отверстия истечения газа, м²; μ – коэффициент истечения газа; P_v – давление в разорвавшемся газопроводе, Па; ρ_v – плотность природного газа, кг/м³; γ – показатель адиабаты.

На основании вычисленного массового расхода для каждого сценария подбираются значения вероятностей возникновения аварийных ситуаций. Их значения являются эмпирическими и принимаются из справочной литературы [10, 13]. Порядок расчета опасных факторов аварий на газопроводе подробно описан в [10]. Результаты определения избыточного давления и импульса фазы сжатия при аварии на газопроводе среднего давления представлены в таблице.

Графическая реализация результатов расчета таких факторов, как давление во фронте ударной волны и интенсивность теплового излучения представлены на рис. 2.

Как видно из графической реализации расчета, распространение опасных факторов подчинено экспоненциальному закону. Согласно приказу Ростехнадзора от 11 апреля 2016 г. № 144 «Методические основы по проведению анализа опасностей и

Избыточное давление и импульс фазы сжатия при аварии на газопроводе среднего давления (тротиловый эквивалент взрыва $W = 0,34187$ Дж/г)

Расстояние от оси газопровода, м	Безразмерное расстояние	Безразмерное давление P_x	Безразмерный импульс фазы сжатия I_x	Избыточное давление волны сжатия ΔP , кПа	Импульс фазы сжатия H , Н·с/м ²
1	0,36844	0,16654	0,08455	16820,66548	68,17140
5	1,84219	0,05581	0,01060	5636,60934	8,54609
10	3,68437	0,02931	0,00504	2960,33444	4,06208
50	18,42185	0,00609	0,00097	614,79165	0,78209
100	36,84371	0,00306	0,00048	308,81612	0,38925
150	55,26556	0,00204	0,00032	206,19304	0,25911
200	73,68742	0,00153	0,00024	154,76314	0,19418
250	92,10927	0,00123	0,00019	123,86732	0,15528
300	110,53113	0,00102	0,00016	103,25433	0,12936
350	128,95298	0,00088	0,00014	88,52303	0,11085

оценки риска аварий на опасных производственных объектах» считается, что безопасной для человека является избыточное давление на фронте падающей ударной волны, равное 5 кПа, и интенсивность теплового излучения – 4 Вт/м². Из анализа рис. 2 следует, что на удалении более 35 м от оси газопровода действие поражающих факторов является неопасным для человека.

Для получения вероятностного критерия поражения используется пробит-функция. В общем случае пробит-функция P_r описывается формулой

$$P_r = a + b \ln S, \quad (3)$$

где a, b – константы, зависящие от степени поражения и вида объекта; S – интенсивность воздействующего фактора.

Таким образом, установлены все необходимые значения для определения $Q_{dj}(a)$. Далее нужно трансформировать полученные выражения с уче-

том того, что рассматриваются только вероятности причинения ущерба людям, находящимся в селитебной зоне объекта проектирования.

Расчет осуществляется по общеизвестным выражениям из университетского курса теории вероятностей для определения значений вероятности полной группы несовместных событий.

Пусть на объекте присутствуют n человек. Вероятность причинения ущерба для j -го человека равна q_j , $j = \overline{1, n}$.

В качестве рабочих следует выдвинуть гипотезы $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_n$, по каждой из которых предполагается, что в результате реализации аварийной ситуации причинен ущерб людям, находящимся в селитебной зоне.

Тогда вероятности гипотез $P(\Gamma_i), i = \overline{1, n}$ определяются через значения $q_j, j = \overline{1, n}$ вероятностей травмирования персонала и людей в селитебной зоне по формуле

$$P(\Gamma_i) = q_i \prod_{\substack{j \in \{1, n\} \\ i \neq j}} (1 - q_j) = \frac{q_i}{P_i} \prod_{j=1}^n P_j, \quad (4)$$

где P_j – вероятность «невредимости» j -го человека, $P_j = 1 - q_j$.

Вероятности $P(\Gamma_i), i = \overline{1, n}$ – априорные (доопытные) вероятности выдвинутых гипотез. Опыт заключается в проверке выполнимости заданных условий. Выражение для определения вероятностей травмирования или гибели людей на селитебной территории в результате аварии на наружном газопроводе может быть представлено в следующем виде:

$$P(E_i) = \frac{\frac{q_i}{P_i} \prod_{j=1}^m P_j}{\sum_{k=1}^m \frac{q_k}{P_k} \prod_{j=1}^m P_j} = \frac{\frac{q_i}{1 - q_i}}{1 + \sum_{k=1}^n \frac{q_k}{1 - q_k}}. \quad (5)$$

Таким образом, получена зависимость для определения величины риска гибели или травмирования людей на селитебной территории в результате возникновения аварийных ситуаций на газопроводе.

Сравнение подходов к определению величин пожарных рисков

Для сравнения существующего $P(E_i)_C$ и предлагаемого $P(E_i)_П$ подходов к вопросу определения пожарного риска при возникновении аварийных ситуаций на газопроводе в статье приведены результаты расчетов, полученных двумя способами.

Величина пожарного риска, полученная на основе *существующего подхода*, вычислена по формуле (3)

$$\begin{aligned} P(E_i)_C = & 3,06908 \cdot 10^{-8} + 1,2338 \cdot 10^{-10} + \quad (6) \\ & + 2,96887 \cdot 10^{-9} + 1,28703 \cdot 10^{-8} + 5,174 \cdot 10^{-11} + \\ & + 1,24501 \cdot 10^{-9} + 4,83735 \cdot 10^{-8} + 4,33555 \cdot 10^{-10} + \\ & + 3,19292 \cdot 10^{-9} + 2,04657 \cdot 10^{-8} + 1,83427 \cdot 10^{-10} + \\ & + 1,35085 \cdot 10^{-9} + 2,94168 \cdot 10^{-9} + 3,76992 \cdot 10^{-10} + \\ & + 8,81328 \cdot 10^{-10} = 5,18 \cdot 10^{-8}. \end{aligned}$$

В представленном расчете значение Q_j вычислено при использовании пробит-функции.

Результаты, приведенные далее, получены с использованием *предлагаемого подхода*, в котором значение $P(E_i)_П$ определено по формуле (5)

$$\begin{aligned} P(E_i)_П = & 4,22 \cdot 10^{-7} + 1,2585 \cdot 10^{-10} + \quad (7) \\ & + 2,17887 \cdot 10^{-9} + 1,9878 \cdot 10^{-7} + 5,23 \cdot 10^{-8} + \\ & + 1,4401 \cdot 10^{-9} + 4,735 \cdot 10^{-8} + 4,545 \cdot 10^{-8} + \\ & + 3,22292 \cdot 10^{-9} + 1,1 \cdot 10^{-8} + 2,43 \cdot 10^{-8} + \\ & + 1,87 \cdot 10^{-9} + 2,8 \cdot 10^{-9} + 3,1692 \cdot 10^{-8} + \\ & + 4,5 \cdot 10^{-8} = 8,8951 \cdot 10^{-7}. \end{aligned}$$

Как видно из выражений (6) и (7), расчетное значение $P(E_i)_П$, полученное с помощью предлагаемого подхода, в 17 раз больше, чем значение $P(E_i)_C$, определенное пробит-функцией. Такая существенная разница в результатах позволяет говорить о том, что предлагаемая в статье методика позволяет более точно определять значения риска травмирования и гибели людей при авариях на наружных газопроводах, а также повышать безопасность газораспределительных сетей на этапе проектирования.

Вывод

Предлагаемый в статье подход дает возможность с достаточной точностью определять значения риска травмирования и гибели людей в результате аварий на наружных газопроводах, расположенных на территории населенных пунктов. Таким образом, если расчетное значение риска аварий на газопроводе превышает значение, установленное Техническим регламентом, то в проекте должны быть дополнительно предусмотрены меры по повышению безопасности газораспределительных сетей в соответствии с требованиями приказа Ростехнадзора от 15 декабря 2020 г. № 528 «Правила безопасного ведения газоопасных, огневых и ремонтных работ» и СП 42-101-2003 «Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических и полиэтиленовых труб».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Горшкова Е. Е., Крутолапов А. С. Инженерно-технические мероприятия гражданской обороны, мероприятия по предупреждению чрезвычайных ситуаций и пожарной безопасности в документах территориального планирования // Безопасность в чрезвычайных ситуациях : сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 23–25 апреля 2015 г.). СПб : СПбГУ Петра Великого, 2015. С. 239–245.
2. Присяжнюк Н. Л., Шишков Ю. А. Оценка пожарного риска территории Красноярского края // Исторический опыт, современные проблемы и перспективы образовательной и научной деятельности в области пожарной безопасности : сб. тезисов докладов материалов Международной науч.-практ. конф. (Москва, 18–19 октября 2018 г.). М. : АГПС МЧС России, 2018. С. 526–532.
3. Ковалев С. А., Кузеванов В. С. Антология безопасности. Пожарная безопасность. Омск : Изд-во Омского гос. ун-та, 2017. 84 с.
4. Зимонин А. А., Фирсов А. В., Бутенко В. М. Травмирование людей на пожарах // Технологии техно-сферной безопасности. 2014. № 5(57). С. 6–7.
5. Порошин А. А., Харин В. В., Бобринев Е. В. [и др.]. Риски гибели и травмирования людей на пожарах // Вестник НЦБЖД. 2019. № 2. С. 127–132.
6. Пучков В. А., Дагиров Ш. Ш., Агафонов А. В. [и др.]. Пожарная безопасность. М. : Академия ГПС МЧС России, 2014. 877 с.
7. Харин В. В., Бобринев Е. В., Кондашов А. А., Удавцова Е. Ю. Статистический подход оценки степени пожарной опасности по соотношению травмированных и погибших при пожарах людей // Вестник НЦБЖД. 2019. № 4. С. 127–135.
8. Швырков С. А. [и др.]. Пожарная безопасность технологических процессов. М. : Академия ГПС МЧС России, 2012. 388 с.
9. Якуш С. Е., Есманский Р. К. Анализ пожарных рисков. Ч. I. Подходы и методы // Проблемы анализа рисков. 2009. Т. 6. № 3. С. 8–27.
10. Об утверждении Методики определения расчетных значений пожарного риска на производственных объектах. URL: <https://base.garant.ru/196118/> (дата обращения: 1.03.2022).
11. Брушлинский Н. Н. [и др.]. Пожарные риски. М. : Академия МЧС России, 2016. 66 с.
12. Антюхов В. И., Остудин Н. В., Сорока А. В. Методика анализа информационной потребности должностных лиц центров управления в кризисных ситуациях МЧС России // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2016. № 4(20). С. 18–28.
13. Тучкова О. А., Строганов И. В., Хайруллин Р. З. Оценка пожарного риска. Казань : Изд-во КНИТУ, 2019. 124 с.

REFERENCES

1. Gorshkova E. E., Krutolapov A. S. Civil defense engineering and technical measures, emergency prevention and fire safety measures in territorial planning documents. *Safety in emergency situations: a collection of works of the All-Russian Scientific-Practical conference* (St. Petersburg, April 23–25, 2015). St. Petersburg, SPbPU Petra Velikogo Publ., 2015, pp. 239–245. (In Russ.).
2. Prisyazhnyuk N. L., Shishkov Yu. A. Fire risk assessment of the Krasnoyarsk territory. *Historical experience, modern problems and prospects of educational and scientific activities in the field of fire safety. Collection of abstracts of the materials of the International Scientific and Practical Conference* (Moscow, October 18–19, 2018). Moscow, AGPS MCHS Rossii Publ., 2018, pp. 526–532. (In Russ.).
3. Kovalev S. A., Kuzevanov V. S. *Antologiya bezopasnosti. Pozharnaya bezopasnost'* [Security anthology. Fire safety]. Omsk, Omskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2017. 84 p. (In Russ.).
4. Zimonin A. A., Firsov A. V., Butenko V. M. Injuring people in fires. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti*, 2014, no. 5(57), pp. 6–7. (In Russ.).
5. Poroshin A. A., Harin V. V., Bobrinev E. V. et al. Risks of death and injury of people in fires. *Vestnik NCBZHD*, 2019, no. 2, pp. 127–132. (In Russ.).
6. Puchkov V. A., Dagirov Sh. Sh., Agafonov A. V. et al. *Pozharnaya bezopasnost'* [Fire safety]. Moscow, Akademiya GPS MCHS Rossii Publ., 2014. 877 p. (In Russ.).
7. Harin V. V., Bobrinev E. V., Kondashov A. A., Udavcova E. Yu. Statistical approach to assessing the degree of fire danger by the ratio of people injured and killed in fires. *Vestnik NCBZHD*, 2019, no. 4, pp. 127–135. (In Russ.).
8. Shvyrkov S. A. et al. *Pozharnaya bezopasnost' tekhnologicheskikh processov* [Fire safety of technological processes]. Moscow, Akademiya GPS MCHS Rossii Publ., 2012. 388 p. (In Russ.).
9. Yakush S. E., Esmanskiy R. K. Fire risk analysis. Ch. I. Approaches and methods. *Problemy analiza riskov*, 2009, vol. 6, no. 3, pp. 8–27. (In Russ.).
10. *On approval of the Methodology for determining the calculated values of fire risk at production facilities*. Available at: <https://base.garant.ru/196118/> (accessed 1.03.2022). (In Russ.).
11. Brushlinskiy N. N. et al. *Pozharnye riski* [Fire risks]. Moscow, Akademiya MCHS Rossii Publ., 2016. 66 p. (In Russ.).
12. Antyuhov V. I., Ostudin N. V., Soroka A. V. Methodology for analyzing the information needs of officials of management centers in crisis situations of the Ministry of Emergency Situations of Russia. *Prirodnye i tekhnogennyye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnyye aspekty)*, 2016, no. 4(20), pp. 18–28. (In Russ.).
13. Tuchkova O. A., Stroganov I. V., Hayrullin R. Z. *Ocenka pozharnogo riska* [Fire risk assessment]. Kazan', KNITU Publ., 2019. 124 p. (In Russ.). ■

Импортозамещение программного обеспечения информационного моделирования зданий и сооружений

Дмитрий Сергеевич ПЕТРОВ, старший преподаватель, gsm1990@mail.ru

Константин Августович ШУМИЛОВ, кандидат технических наук, доцент, shkas@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ),
190005 Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

Аннотация. Приведена информация о развитии технологий информационного моделирования в РФ. Рассмотрены причины необходимости выполнения импортозамещения программного обеспечения иностранного производства. Представлены отечественные программные комплексы, реализующие принципы информационного моделирования. На примере деятельности госкорпорации показаны основные проблемы, с которыми может столкнуться организация при реализации импортозамещения, а также предложены пути их решения силами разработчиков программного обеспечения и внутренними силами организации. Отмечено, что отечественное программное обеспечение позволяет выполнять информационное моделирование зданий и сооружений, а также решать достаточно широкий спектр задач. В случае специализации по отдельным отраслям может потребоваться доработка программных комплексов.

Ключевые слова: информационное моделирование, импортозамещение, BIM, программные комплексы, отечественное программное обеспечение, проектирование, трехмерное моделирование

Для цитирования: Петров Д. С., Шумилов К. А. Импортозамещение программного обеспечения информационного моделирования зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 5. С. 55 – 60. doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.55-60

IMPORT SUBSTITUTION OF INFORMATION MODELING SOFTWARE FOR BUILDINGS AND STRUCTURES

Dmitrii S. PETROV, gsm1990@mail.ru

Konstantin A. SHUMILOV, shkas@mail.ru

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-ya Krasnoarmeyskaya ul., 4,
St. Petersburg 190005, Russian Federation

Abstract. The general information about the development of information modeling technologies in the Russian Federation is given, The reasons for the need to perform import substitution of foreign-made software are presented. Domestic software complexes implementing the principles of information modeling are presented. Using the example of the state corporation's activities, the main problems that an organization may face when implementing import substitution are shown, as well as ways to solve them by software developers and internal forces of the organization are proposed. It is noted that domestic software makes it possible to perform information modeling of buildings and structures, as well as solve a fairly wide range of tasks, in the case of specialization in certain industries, it may be necessary to finalize software complexes.

Keywords: information modeling, import substitution, BIM, software complexes, domestic software, design, three-dimensional modeling

For citation: Petrov D. S., Shumilov K. A. Import Substitution of Information Modeling Software for Buildings and Structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2022, no. 5, pp. 55 – 60. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.55-60

Введение

Современные технологии позволяют осуществлять проектирование зданий и сооружений в цифровом формате – практически полностью моделировать жизненный цикл объекта строительства, наполняя каждый элемент

необходимой информацией на любом из этапов [1–4].

Подход, при котором используются такие технологии, называется информационным моделированием зданий. Потенциально возможности цифровых информационных моделей решают

огромное количество задач, уменьшают количество ошибок и предотвращают принятие критических решений, тем самым экономя ресурсы, затрачиваемые на инвестиционно-строительный объект [5–10].

На данный момент в России

внедрение технологий информационного моделирования зданий проходит достаточно эффективно, причем охват осуществляется с разных сторон [11]. Частные строительные и проектные компании внедряют информационное моделирование зданий в свои рабочие процессы с целью оптимизации и повышения прибыли. Государство разрабатывает нормативно-правовые документы, регламентирующие процессы информационного моделирования зданий для обеспечения взаимодействия госструктур, госзаказов и госнадзора со строительными и проектными компаниями, например СП 333.1325800.2020 «Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла». Государственные и частные учебные учреждения разрабатывают образовательные программы, направленные на обучение методам работы в цифровой среде, современных программных комплексах, позволяющих создавать цифровую модель здания.

Вся строительная индустрия активно внедряет информационные технологии в свои рабочие процессы, постепенно повышая их качество.

Проблемы и возможные решения импортозамещения

Опыт проектирования показывает, что применение информационного моделирования в строительно-проектной практике действительно позволяет повысить качество проектирования, точность проектных решений и узлов, сформировать цепочки процессов строительства, логистики и производства. Трехмерное проектирование в рамках всей информационной модели дает возможность на этапе проекта снять коллизии различных смежных разделов, предотвратить пе-

ресечения элементов здания (например, пересечение балки с водопроводом или трубой системы отопления), выбрать оптимальные технические решения, максимально точно отразить будущие параметры строящегося объекта.

До внедрения информационных моделей многие корректировки и доработки приходилось вносить в проект уже непосредственно на этапе возведения здания или сооружения. При использовании технологий информационного проектирования появляется возможность учесть многие факторы и переместить большой объем изменений на этап проектирования. Но по мере внедрения таких технологий, а также с учетом обстановки окружающего мира, появляются новые задачи, которые требуют решения [12].

Принципы информационного моделирования и первые программные комплексы для создания информационной модели здания были разработаны европейскими и американскими специалистами, а идеология информационного проектирования зданий пришла к нам как BIM — Building Information Modelling [13]. Соответственно, иностранные разработчики программного обеспечения (ПО) полностью могут контролировать возможности своих программных комплексов и принимать решения о выдаче и продлении лицензий, расширениях, обновлениях и ограничениях функциональных возможностей программных продуктов. В этой связи реализация информационного моделирования в нашей стране являлась крайне зависимой от политики иностранных компаний, которые, в свою очередь, выполняют обязательства перед государствами, где они функционируют.

Недавние события на мировой арене показали, что междуна-

родные отношения могут быть неустойчивы. Рост напряженности отражается на сотрудничестве не только государств, но и компаний. Появились первые прецеденты, когда иностранные компании, находящиеся под юрисдикцией США и Европейского союза, отказывались предоставлять лицензии российским государственным предприятиям на свое программное обеспечение, например блокировка ZOOM для предприятий российского государственного сектора.

Помимо прочего, иностранное программное обеспечение при подключении оборудования к сети интернет имеет возможность передачи данных на серверы разработчиков программного обеспечения, что для российских компаний ведет к возможной утечке информации как коммерческого характера, так касающейся безопасности отдельных структур и государства в целом.

Для повышения устойчивости развития информационного моделирования в нашей стране требуется отечественное программное обеспечение, функционирующее вне зависимости от международных отношений. Вопрос импортозамещения программного обеспечения в стратегически важных отраслях является крайне важным и требует оперативного решения.

На данный момент на территории РФ разработаны и активно развиваются следующие программные комплексы, реализующие принципы информационного моделирования:

- Renga от компании Renga Software;
- пакет программ NanoCAD от компании Нанософт/CSoft Development;
- НЕОСИНТЕЗ от группы компаний «Неолант».

Программный комплекс Renga существенно изменился за последние годы: продукт стал еди-

ным пакетом (ушло разделение на Архитектуру, Конструкции и Инженерию) и теперь представляет собой единое универсальное BIM-решение [14]. Renga имеет все признаки BIM-подхода: проект — это база данных, а не набор файлов, модель — один файл, а не собранная из внешних ссылок вручную обновляемая модель, данные — взаимосвязанные и взаимовлияющие, виды — автоматически формируемые и обновляемые. У Renga современный и удобный интерфейс, есть перспективы взаимодействия с системами управления от 1С [15].

Но в целом функционал программного продукта явно требует развития и отстает от западного ПО. Первая проблема — это размерности и детализация проектирования. Современные BIM-модели — это тысячи объектов, огромное число параметров и множество специализированных инструментов. Сейчас же в Renga ростверки приходится моделировать балкой. На серьезном многоэтажном объекте трудозатраты возрастают многократно. Вторая проблема — это генерация документации. У Renga (аналогично Revit) сейчас практически нет полноценного 2D-редактора для оформления документации и нет хорошей поддержки формата DWG (самого массового и популярного формата для выпуска 2D-документации). Соответственно, модель и документация разрываются, что приводит к большому количеству ручного труда. И, наконец, третье — это попытка охватить широту, без детальной проработки специальностей. И Renga, и Revit подходят к этому процессу как к архитектурно-строительному проектированию. Инженерные разделы проекта существенно отличаются по подходам проектирования, где моделирование должно основываться на инженерных расчетах. Подбор оборудования

и принятие инженерного решения напрямую зависят от расчетов.

По итогу анализа ПО Renga пока не может получить более 20 % в архитектуре (полностью документацию без ручной доработки выпустить нельзя, встроенной визуализации нет, интеллектуальные средства моделирования ограничены, информатизация во многом ручная), 10 % в конструкциях (то же, что и архитектура + мало специализированных инструментов для конструкторов) и 5 % для инженерии (то же, что и АР/КР + пустые базы, нет инженерных расчетов).

Из положительных моментов можно отметить динамику развития пакета, Renga позиционируется сейчас на все разделы.

BIM-решение от компании Нанософт / CSoft Development представлено следующими программными комплексами:

- GeoniCS (nanoCAD Геоника) для формирования цифровых информационных моделей земли (ЦИМ земли): от изысканий до генплана, от площадок до линейно-протяженных объектов с возможностью выгрузки данных о внешних инженерных сетях в формат IFC (концепция OpenBIM);

- Model Studio для проектирования промышленных объектов фактически любых размерностей. Комплекс Model Studio активно развивается, выстраивая интеллектуальную единую трехмерную модель, которую в дальнейшем можно использовать для согласования, выпуска рабочей документации, специфицирования, эксплуатации и т. д. Демонстрируемые проекты Model Studio впечатляют своими размерностями, в последних версиях появились модули Генплан, Отопление и вентиляция, а также прямая поддержка самых современных версий платформы nanoCAD;

- nanoCAD Конструкторский BIM для проектирования металлических и железобетонных конструкций зданий и сооружений на принципах информационного моделирования, интегрируется со смежными специальностями через формат IFC (концепция OpenBIM), а также через инфраструктуру CADlib комплекса Model Studio;

- часть комплекса Project StudioCS, состоящего из пяти разделов: Электрика, СКС, ОПС, ВК и Отопление (nanoCAD Электро, СКС, ОПС, ВК и Отопление, объединенные в комплекс nanoCAD Инженерный BIM). Решения интересны тем, что не просто «заточены» под рынок гражданского проектирования, но и закрывают уникальные разделы, связанные с кабеленесущей частью здания — ни одно западное решение здесь не составляет серьезной конкуренции;

- nanoCAD ВК для автоматизированного проектирования внутренних систем горячего и холодного водоснабжения и канализации, а также водяного пожаротушения с использованием пожарных кранов;

- nanoCAD Отопление для автоматизированного проектирования систем отопления зданий и сооружений.

Пользователи получают пять инженерных разделов, которые выстраивают пять BIM-моделей в рамках специальностей и оперируют интеллектуальными объектами, связанными друг с другом, с расчетами и с обновлениями при проведении изменений в проекте.

Система управления инженерными данными НЕОСИНТЕЗ объединяет разнородную информацию об объекте и всех участниках процесса управления в единую информационную среду, включая управляющие компании, эксплуатирующие, ремонтные, строительные, субподрядные, проектно-конструктор-

ские и научно-исследовательские организации; органы надзора и контроля.

Эта система отличается высокой степенью гибкости, «бесшовной» интеграцией с другими программными инструментами, работанными как на базе технологий ГК «Неолант», так и на базе других вендоров. Комплекс обладает высоким быстродействием, простым и интуитивно понятным интерфейсом, универсальным API.

Перечисленное программное обеспечение выполнено отечественными разработчиками, все серверы находятся на территории РФ, деятельность компаний полностью регламентируется российским законодательством и надзорными органами. В ближайшее время планируется адаптация данных ПК к операционной системе Astra Linux, рекомендованной в качестве основной в компаниях государственного сектора.

Историю развития информационного моделирования зданий и сооружений в России можно условно поделить на два этапа:

- появление иностранного программного обеспечения и внедрение принципов BIM в строительную отрасль;
- создание отечественного программного обеспечения информационного моделирования зданий и сооружений, все более конкурентоспособного по отношению к иностранным аналогам, и постепенное замещение иностранных ПК отечественными.

Реализация второго этапа — процессов импортозамещения также влечет за собой сложности.

Рассмотрим ситуацию на основе атомной отрасли. Госкорпорация «Росатом» — главный оператор всех российских и некоторых зарубежных атомных электростанций. В состав госкорпорации входит множество структур-

ных подразделений, в том числе занимающихся проектированием, строительством, эксплуатацией и демонтажом атомных электростанций [16].

При проектировании таких объектов применяется различное программное обеспечение: для задач проектирования конструкций, инженерных сетей, технологических и производственных процессов. Каждый вид работ обладает своим статусом секретности и допуска, а соответственно, и функциями программного обеспечения. Конкретные данные по видам и доле программного обеспечения являются коммерческой тайной компании, поэтому рассмотрим сведения, находящиеся в свободном доступе в сети интернет.

В 2019 г. основное проектирование зданий и сооружений выполнялось в двухмерных ПК иностранного производства, началось внедрение трехмерных ПК, реализующих принципы информационного моделирования. С 2021 г. активно внедряется отечественный софт, установка лицензий на рабочие места сотрудников. При переходе на новое отечественное программное обеспечение были выявлены следующие проблемы [17, 18]:

- нежелание сотрудников переучиваться на работу в отечественных программах;
- несоответствие функционала ПК решаемым задачам;
- отсутствие отечественных аналогов для некоторых иностранных ПК;
- сложности во взаимной увязке и совместной работе отдельных программных продуктов, нарушение качества моделей при операциях импорта/экспорта элементов;
- трудности с адаптацией отечественных ПК под операционную систему Astra Linux.

Для устранения данных проб-

лем были приняты следующие решения:

- переобучение и адаптация сотрудников для работы в новом программном обеспечении, набор на работу сотрудников, обладающих требуемыми компетенциями для работы в отечественном ПО;
- доработка программных решений и создание программных продуктов силами разработчиков ПО и сотрудников проектных подразделений непосредственно под задачи атомной отрасли, на основе реального практического опыта;
- адаптация ПО под специфику работы операционной системы Astra Linux силами разработчиков.

Результаты выполнения данной объемной работы позволят обеспечить устойчивость систем проектирования и строительства объектов госкорпорации «Росатом».

Многие решения, разработанные и реализованные в госкорпорации становились пилотными и для других отраслей промышленности и сфер народного хозяйства, например цифровизация городской среды [19].

Вывод

В России создано отечественное программное обеспечение, позволяющее выполнять информационное моделирование зданий и сооружений. В настоящее время отечественные программные комплексы информационного моделирования Renga, НЕО-СИНТЕЗ, программы NanoCAD могут решать достаточно широкий спектр задач, их доработка требуется в случае специализации по отдельным отраслям.

При реализации импортозамещения возникают закономерные сложности, но благодаря имеющимся ресурсам компаний и государства данные проблемы могут быть решены.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Талапов В. В. Основы BIM: введение в информационное моделирование зданий. М. : ДМК Пресс, 2011. 392 с.
2. Чигинский Д. С., Валеев Г. В. Применение BIM-технологий при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры : материалы IV междунар. науч.-практ. конф. СПб, 2021. С. 248–254.
3. Wijayakumar M., Jayasena H. S. Automation of BIM quantity take-off to suit QS's requirements [Автоматизация количественного учета информационной модели здания в соответствии с требованиями QS] // Department of building economics, university of Moratuwa, Sri Lanka. The Second World Construction Symposium 2013: Socio-Economic Sustainability in Construction. 14–15 June 2013, Colombo, Sri Lanka, pp. 70–80.
4. Song Wu, Gerard Wood, Kanchana Ginige, Siaw Wee Jong. A technical review of BIM based cost estimating in UK quantity surveying practice, standards and tools [Технический обзор оценки затрат на основе информационного моделирования зданий в практике, стандартах и инструментах количественной съемки в Великобритании] // Journal of Information Technology in Construction. 2014. Vol. 19. P. 534.
5. Как экономить архитекторам деньги. URL: <https://archspeech.com/article/kak-bim-tehnologii-pomogayut-ekonomit-arhitektoram-den-gi> (дата обращения: 16.01.2022).
6. Чубарова К. В., Тальников Д. М. Перспективы использования BIM при капитальном ремонте и реконструкции зданий // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры : материалы IV междунар. науч.-практ. конф. СПб, 2021. С. 419–425.
7. Smith P. BIM & the 5D project cost manager [Информационное моделирование зданий и 5D управление затратами проекта] // Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2014. No. 119. Pp. 475–484.
8. Forgues D., Iordanova I., Valdivieso F., Staub-French S. Rethinking the cost estimating process through 5D BIM: a case study [Переосмысление процесса оценки затрат с помощью 5D информационного моделирования зданий: тематическое исследование] // Materials of Construction Research Congress. ASCE. 2012. Pp. 778–786.
9. Воронин И. А., Изатов В. А., Пурс Г. А. Требования технологий информационного моделирования к сметно-нормативной базе Республики Беларусь // Строительство и ценообразование. 2021. № 3(47). С. 9–14.
10. Воронин И. А., Изатов В. А., Пурс Г. А. Ценообразование и технология информационного моделирования в строительстве на этапах жизненного цикла строительной продукции // Строительство и ценообразование. 2019. № 2(30). С. 3–8.
11. Ожигин Д. А. Анализ текущей ситуации на российском BIM-рынке в области гражданского строительства. URL: <https://habr.com/ru/company/nanosoft/blog/276587/> (дата обращения: 17.01.2022).
12. Лушников А. С. Проблемы и преимущества внедрения BIM-технологий в строительных компаниях // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 6(53). С. 252–256.
13. Вольф И. BIM в мире – обыденность, в России – пока эксклюзив // Строительство. 2020. № 5. С. 32–35.
14. Шершнева А. В., Пурс Г. А., Изатов В. А., Воронин И. А. Автоматизированные интеллектуальные экспертные системы экономики строительства в работе BIM-систем // Информационные технологии в технических, правовых, политических и социально-экономических системах : материалы междунар. науч.-практ. конф. Минск : БНТУ, 2017.
15. Режелов С. В. Renga vs Revit. Выбираем BIM-инструмент на примере возможностей армирования. URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=19900 (дата обращения: 20.01.2022).
16. Сборщиков С. Б. К вопросу модернизации систем обеспечения качества строительства объектов ядерной энергетики // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 1. С. 219–225.
17. Згода Ю. Н., Шумилов К. А. Проблемы и перспективы автоматизированного построения интерактивной визуализации информационных моделей зданий Autodesk Revit и Renga // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры : материалы II междунар. науч.-практ. конф. СПб : СПбГАСУ, 2019. С. 118–123.
18. Суханов К. О., Самолетов М. В. Проблемы взаимодействия программных комплексов в процессе работы с информационной моделью здания // Там же. С. 184–188.
19. Росатом создаст компанию по цифровизации атомной отрасли. URL: <https://ria.ru/20190311/1551685072.html> (дата обращения: 14.01.2022).

REFERENCES

1. Talapov V. V. *Osnovy BIM: vvedenie v informatsionnoe modelirovanie zdaniy* [The basics of BIM: an introduction to building information modeling]. Moscow, DМК Press Publ., 2011. 392 p. (In Russ.).
2. Chiginskiy D. S., Valeev G. V. Application of BIM technologies in the survey of building structures of buildings and structures. BIM-modelirovanie v zadachakh stroitel'stva i arkhitektury [BIM modeling in construction and architecture tasks]. *Materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. St. Petersburg, 2021, pp. 248–254. (In Russ.).
3. Wijayakumar M., Jayasena H. S. Automation of BIM quantity take-off to suit QS's requirements. *Department of building economics, university of Moratuwa, Sri Lanka. The Second World Construction Symposium 2013. Socio-Economic Sustainability in Construction*. 14–15 June 2013, Colombo, Sri Lanka, pp. 70–80.
4. Song Wu, Gerard Wood, Kanchana Ginige, Siaw Wee

- Jong. A technical review of BIM based cost estimating in UK quantity surveying practice, standards and tools. *Journal of Information Technology in Construction*, 2014, vol. 19, p. 534.
5. Available at: <https://archspeech.com/article/kak-bim-tehnologii-pomogayut-ekonomit-arhitektozamden-gi> (accessed 16.01.2022).
 6. Chubarova K. V., Tal'nikov D. M. Prospects for the use of BIM in major repairs and reconstruction of buildings. *BIM-modelirovanie v zadachakh stroitel'stva i arkhitektury* [BIM modeling in construction and architecture tasks]. Materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. St. Petersburg, 2021, pp. 419–425. (In Russ.).
 7. Smith P. BIM & the 5D project cost manager. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 2014, no. 119, pp. 475–484.
 8. Forgues D., Iordanova I., Valdivieso F., Staub-French S. Rethinking the cost estimating process through 5D BIM: a case. *Materials of Construction Research Congress. ASCE*, 2012, pp. 778–786.
 9. Voronin I. A., Izatov V. A., Purs G. A. Requirements of information modeling technologies to the budget and regulatory framework of the Republic of Belarus. *Stroitel'stvo i tsenoobrazovanie*, 2021, no. 3(47), pp. 9–14. (In Russ.).
 10. Voronin I. A., Izatov V. A., Purs G. A. Pricing and information modeling technology in construction at the stages of the life cycle of construction products. *Stroitel'stvo i tsenoobrazovanie*, 2019, no. 2(30), pp. 3–8. (In Russ.).
 11. Available at: <https://habr.com/ru/company/nanosoft/blog/276587/> (accessed 17.01.2022). (In Russ.).
 12. Lushnikov A. S. Problems and advantages of implementing BIM technologies in construction companies. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2015, no. 6(53), pp. 252–256. (In Russ.).
 13. Vol'fi. BIM is commonplace in the world, while in Russia it is exclusive. *Stroitel'stvo*, 2020, no. 5, pp. 32–35. (In Russ.).
 14. Shershnev A. V., Purs G. A., Izatov V. A., Voronin I. A. Automated intelligent expert systems of construction economics in the work of BIM systems. *Informatsionnye tekhnologii v tekhnicheskikh, pravovykh, politicheskikh i sotsial'no-ekonomicheskikh sistemakh* [Information technologies in technical, legal, political and socio-economic systems]. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Minsk, BNTU Publ., 2017. (In Russ.).
 15. Available at: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=19900 (accessed 20.01.2022). (In Russ.).
 16. Sborshchikov S. B. On the issue of modernization of quality assurance systems for the construction of nuclear power facilities. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2019, no. 1, pp. 219–225. (In Russ.).
 17. Zgoda Yu. N., Shumilov K. A. Problems and prospects of automated construction of interactive visualization of information models of buildings Autodesk Revit and Renga. *BIM-modelirovanie v zadachakh stroitel'stva i arkhitektury* [BIM-modeling in construction and architecture tasks]. Materialy II mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2019, pp. 118–123. (In Russ.).
 18. Sukhanov K. O., Samoletov M. V. Problemy vzaimodeystviya programmnykh kompleksov v protsesse raboty s informatsionnoy model'yu zdaniya. *Ibid*, pp. 184–188. (In Russ.).
 19. Available at: <https://ria.ru/20190311/1551685072.html> (accessed 14.01.2022). (In Russ.). ■

Российская инженерная академия совместно с Ассоциацией технических университетов и Российским государственным университетом им. А. Н. Косыгина начали прием документов на Всероссийский конкурс молодых ученых им. Ивана Федорова на лучшую научно-исследовательскую работу

Прием работ – с 1 мая по 1 ноября 2022 г.

Конкурс проводится по следующим номинациям:

- Авиакосмическая отрасль;
- Безопасность деятельности человека;
- Водное хозяйство и гидротехника;
- Геология, добыча и переработка полезных ископаемых;
- Железнодорожный транспорт;
- Инженерная биотехнология;
- Инженерная геометрия и компьютерная графика;
- Инженерная механика;
- Инженерная региональная политика;
- Инженерная экология и ресурсосбережение;
- Инженерные проблемы стабильности и конверсии;
- Информационная безопасность;
- Информационные системы, вычислительная и электронная техника, связь и телекоммуникации;

- Коммуникации (транспортные системы и др.);
- Лесотехнические технологии;
- Материаловедение и технология;
- Машиностроение (автомобильное, тракторное, строительное и дорожное);
- Приборостроение, метрология, информационно-измерительные приборы и системы;
- Процессы и машины агроинженерных систем;
- Системы управления, диагностика;
- Строительство и архитектура;
- Химические технологии;
- Электротехника;
- Энергетика;
- Экономика и управление народным хозяйством;
- Экономическая безопасность и др.

Сайт конкурса <https://molodoy-ucheniy.ru/>

УДК 625.8

doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.61-65

Прогнозирование жизненного цикла дорожных одежд нежесткого типа

Мария Петровна КЛЕКОВКИНА, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой автомобильных дорог, мостов и тоннелей, megapolis775@mail.ru

Эльвира Дмитриевна БОНДАРЕВА, кандидат технических наук, доцент, bondareva_ed@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), 190005 Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

Аннотация. Представлены материалы исследования теоретического подхода по учету и прогнозированию процессов постепенного накопления остаточных деформаций и повреждений в результате контактирования слоев дорожной одежды и реальных связей элементов, влияющих на неравномерность деформирования, изменения напряженно-деформированного состояния и срока службы. Для эффективного использования финансовых и материально-технических ресурсов при проектировании предложен многоэтапный расчет многослойной дорожной одежды, позволяющий планировать необходимые ремонты дороги в пределах ее жизненного цикла. Приведена методика расчета нежесткой дорожной одежды на стадии разработки проекта дороги, в соответствии с которой в течение жизненного цикла, равного двум срокам между капитальными ремонтами, периодически осуществляется восстановление слоев с битумным вяжущим при обязательном соответствии прочностных показателей требуемому уровню надежности. Использование данной методики позволит обеспечить существенную экономию ресурсов в течение всего жизненного цикла автомобильной дороги.

Ключевые слова: нежесткая дорожная одежда, прогнозирование жизненного цикла, покрытие, прочность, расчет дорожной одежды, слой износа

Для цитирования: Клековкина М. П., Бондарева Э. Д. Прогнозирование жизненного цикла дорожных одежд нежесткого типа // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 5. С. 61 – 65.

doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.61-65

FORECASTING THE LIFE CYCLE OF NON-RIGID PAVEMENTS

Maria P. KLEKOVKINA, megapolis775@mail.ru

Elvira D. BONDAREVA, bondareva_ed@mail.ru

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-ya Krasnoarmeiskaya ul., 4, St. Petersburg 190005, Russian Federation

Abstract. The materials of the study of the theoretical approach to accounting and forecasting the processes of gradual accumulation of residual deformations and damages as a result of contacting layers of pavement and real connections of elements affecting the unevenness of deformation, changes in the stress-strain state and service life are presented. For the effective use of financial and material-technical resources in the design, a multi-stage calculation of multilayer pavement is proposed, which makes it possible to plan the necessary repairs of the road within its life cycle. The method of calculating non-rigid pavement at the stage of road design development is given, according to which, during the life cycle equal to two terms between major repairs, the restoration of layers with bitumen binder is periodically carried out with the mandatory compliance of strength indicators with the required level of reliability. The use of this technique will make it possible to provide the significant resource savings throughout the entire life cycle of the highway.

Keywords: non-rigid pavement, life cycle forecasting, coating, durability, calculation of road pavement, wear layer

For citation: Klekovkina M. P., Bondareva E. D. Forecasting the Life Cycle of Non-Rigid Pavements. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2022, no. 5, pp. 61 – 65. (In Russ.).

doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.61-65

Введение

Прогнозирование характеристик протекания жизненного цикла автомобильной дороги с разной степенью интенсивности связей и повреждений (остаточных деформаций) — современный подход к конструированию, рас-

чету и оценке основных параметров дорожной одежды.

Жизненный цикл дороги (при множестве разных определений) представляет собой эффективный временной период ее активного функционирования под воздействием транспортных и при-

родно-климатических факторов. Этот период характеризуется необходимой степенью динамической устойчивости к изменению формы и положения дороги, обуславливающей сроки ее службы на основе постепенного изменения ровности.

В настоящее время конструкции многослойных дорожных одежд содержат в основном битумные материалы, и сложность прогнозирования сроков службы слоев отдельно и в составе дорожной одежды обусловлена непрерывными изменениями их характеристик. Это проявляется вследствие воздействия температурно-влажностного режима, динамических транспортных нагрузок, а также непрерывных усталостных преобразований вяжущих в процессе эксплуатации дороги. Соответственно, такие материалы обладают свойствами упругих, вязкоупругих и вязкоупругопластичных сред. При отрицательной температуре данные слои приобретают свойства хрупкого тела, повышаются модули упругости и сопротивления сжатию, и одновременно снижается способность деформирования без нарушения сплошности слоя при сопротивлении изменению размеров.

Неопределенным при расчете остается вопрос характера контактирования смежных слоев дорожной одежды, т. е. условий сопряжения слоев (верхних и нижних) на контакте в интервале от спяянного до гладкого, что значительно изменяет напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции, равномерность деформирования, увеличивая коэффициент вариации и сокращая срок службы дорожной одежды.

Нерешенной остается задача оценки развития и интенсивности возникновения повреждений (количества и видов) в течение жизненного цикла, влияющих на прогнозирование срока службы и установление связи между прочностью и ровностью.

Методы и материалы исследования

Жизненный цикл дорожных одежд — период времени, в течение которого в дорожной одежде с накоплением остаточных де-

формаций и старением вяжущего под воздействием природно-климатических факторов периодически заменяются только слои, содержащие битумное вяжущее [1–13]. Битумосодержащий слой [14] состоит из:

- верхнего слоя покрытия, обеспечивающего сцепные качества дороги, устойчивость к истиранию и температурному трещинообразованию;
- нижнего слоя покрытия, отвечающего за сохранение несущей способности и устойчивости к колееобразованию;
- верхнего слоя основания, обеспечивающего устойчивость к колееобразованию, а также усталостную и низкотемпературную трещиностойкость.

Верхний слой покрытия, помимо перечисленных функций, при отсутствии защитного слоя, например из литых эмульсионно-минеральных смесей (ЛЭМС), является слоем износа, т. е. предохраняет нижележащие слои от непосредственного воздействия колес автомобильного транспорта и природно-климатических факторов.

При достаточной прочности дорожной конструкции (несущих слоев основания дорожной одежды и грунта рабочего слоя) пластическая колея и другие виды деформаций в основном образуются в слоях покрытия. По этой причине слои покрытия, прежде всего верхний слой, в процессе эксплуатации должны периодически восстанавливаться [15].

Согласно ГОСТ 58861–2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Капитальный ремонт и ремонт. Планирование межремонтных сроков», частота восстановления верхнего слоя при выполнении им функции слоя износа зависит от материала, фактической интенсивности движения на крайней полосе и дорожно-климатической зоны. Для эффективного использования мате-

риальных ресурсов предлагается производить расчет дорожной одежды в несколько этапов.

Этап 1. По методике ПНСТ 542–2021 «Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования» рассчитывают конструкцию дорожной одежды по всем критериям прочности, морозоустойчивости и осушения на срок службы до капитального ремонта $T_{сл1}$. В результате этого расчета назначают толщины всех слоев основания и нижнего слоя покрытия.

Этап 2. В соответствии с ГОСТ 58861 определяют первый срок замены (восстановления) верхнего слоя дорожной одежды, выполняющего функцию слоя износа t_1 , и по данным расчета на прочность по интенсивности $\sum_1^t N$ устанавливают толщину верхнего слоя покрытия. Общая толщина дорожной одежды должна быть не менее требуемой по критерию морозоустойчивости в течение всего жизненного цикла.

Этап 3. По истечении срока t_1 согласно ГОСТ 58861 определяют новый срок замены (восстановления) верхнего слоя покрытия t_2 и рассчитывают толщину верхнего слоя покрытия на срок службы дорожной одежды $t_1 + t_2$ и так далее, до года ремонта слоев покрытия T_p . С ростом интенсивности движения в процессе расчета толщина верхнего слоя покрытия может увеличиться.

Этап 4. В год ремонта покрытия T_p выполняют замену слоев покрытия, как правило, верхнего и нижнего. При необходимости проводят корректировку толщин слоев покрытия в большую сторону.

Этап 5. Затем устанавливают толщину верхнего слоя покрытия с интервалами, кратными замене слоя износа, до года службы дорожной одежды между капитальными ремонтами $T_{сл1}$ или до года реконструкции дороги, который назначают:

- на дорогах II–IV категорий, когда приведенная интенсивность движения к легковому автомобилю в обоих направлениях превышает значения табл. 4.1 СП 34.13330.2012 «СНиП 2.05.02-85* Автомобильные дороги»;
- на дорогах I категории при превышении значений табл. 5.13 СП 34.13330, увеличивая количество полос движения.

Этап 6. В год реконструкции следует заново рассчитать конструкцию дорожной одежды по параметрам для дороги более высокой категории или с увеличенным количеством полос движения, сохранив толщины слоев дорожной одежды, не содержащих битумное вяжущее.

Далее повторяют этапы 1–6.

В процессе расчета дорожной одежды на всех этапах коэффициенты прочности по всем критериям должны быть больше минимально требуемых значений.

Жизненный цикл дорожной одежды представляет собой отрезок времени от года ввода дороги в эксплуатацию до года второго капитального ремонта или года второй реконструкции дороги (30–50 лет). В конце жизненного цикла существующую конструкцию дорожной одежды полностью разбирают и проектируют новую конструкцию дорожной одежды, повторяя этапы 1–6.

На каждом этапе в процессе ремонта перед заменой слоя износа производят фрезерование старого деформированного слоя на глубину колеи с запасом 1–2 см.

При выполнении расчетов дорожной одежды на прочность в соответствии с п. 7.5.1 ПНСТ 542–2021 верхнюю часть слоя износа на глубину колеи толщиной 2–3 см не учитывают.

Толщина слоя покрытия, устраиваемого из асфальтобетонных или щебеночно-мастичных смесей с номинальным максимальным размером минерального заполнителя не более 11,2 мм,

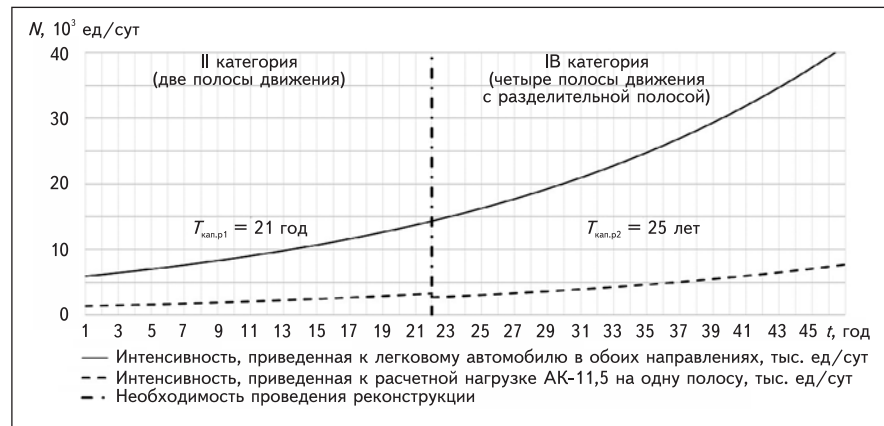


Рис. 1. Прогноз интенсивности движения в течение жизненного цикла автомобильной дороги «Подход от федеральной дороги А-181 «Скандинавия» до международного пропуска «Брусничное»

может меняться в пределах от 3 до 7 см, более 11,2 мм — от 4 до 8 см. При необходимости по расчету большей толщины слоя в процессе ремонта утраивают два слоя покрытия.

Сроки ремонта и необходимые толщины периодически восстанавливаемых слоев (одного или двух) покрытия на каждом этапе жизненного цикла дорожной одежды необходимо вносить в информационную модель автомобильной дороги (ВИМ-модель объекта) на стадии разработки проекта и при сдаче ее в эксплуатацию.

Предлагаемая методика прогнозирования жизненного цикла дорожной одежды апробирована на дороге II категории с двумя полосами движения «Подход от федеральной дороги А-181 «Скандинавия» до международного пропуска «Брусничное».

Исходные данные: приведенная интенсивность движения в обоих направлениях на 1-й год эксплуатации дороги $N_{пр.л} = 6512$ ед./сут, расчетная интенсивность движения на одну полосу для нагрузки АК-11,5 $N_{АК-11,5} = 3256$ ед./сут на год капитального ремонта $T_{сл1} = 24$ года. Коэффициент ежегодного прироста интенсивности движения $q = 1,043$. Функцию слоя износа выполняет верхний слой покрытия. Интервалы

проведения работ по устройству слоя износа приняты по табл. 11 ГОСТ Р 58861.

Изменение интенсивности движения в пределах жизненного цикла показано на рис. 1. Как следует из графика, первую реконструкцию следует выполнять на 22-й год эксплуатации дороги, поскольку в этот год приведенная к легковому автомобилю интенсивность движения $N_{пр.л} = 14000$ ед./сут превысит предельно допустимую для дороги II категории с двумя полосами движения согласно табл. 4.1 СП 34.13330. Таким образом, срок службы дорожной одежды на первом этапе $T_{кап.р1} = 21$ год. На этот срок слои дорожной одежды рассчитывают при уровне надежности $K_n = 0,95$ (табл. 5 ПНСТ 542–2021 для дороги II категории с капитальным типом дорожной одежды).

Расчетные показатели дорожной одежды в течение жизненного цикла приведены в таблице. Таким образом, в течение первых 21 лет верхний слой покрытия восстанавливают 3 раза с интервалом в 5,5 лет и 1 раз — через 4,5 года.

В год первой реконструкции (22-й год) дорога будет переведена в категорию IV с четырьмя полосами движения в обоих направлениях. Поэтому дорожную

Расчетные показатели дорожной одежды в течение жизненного цикла

Показатель	Годы эксплуатации										
	1	6,5	12	17,5	22	26,5	31	35,5	40	43,5	47
Фактическая интенсивность на полосу, авт/сут	2819	3480	4480	5768	5584	6893	8157	9653	11915	14100	15999
Интервалы между ремонтами, год	5,5	5,5	5,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	3,5	3,5	—
Толщина восстанавливаемого слоя, см	4	4	5	6	4 + 9 + 13	5	5	6	6	7	—
Общая толщина дорожной одежды, см	115	115	116	117	121	122	122	123	123	124	—

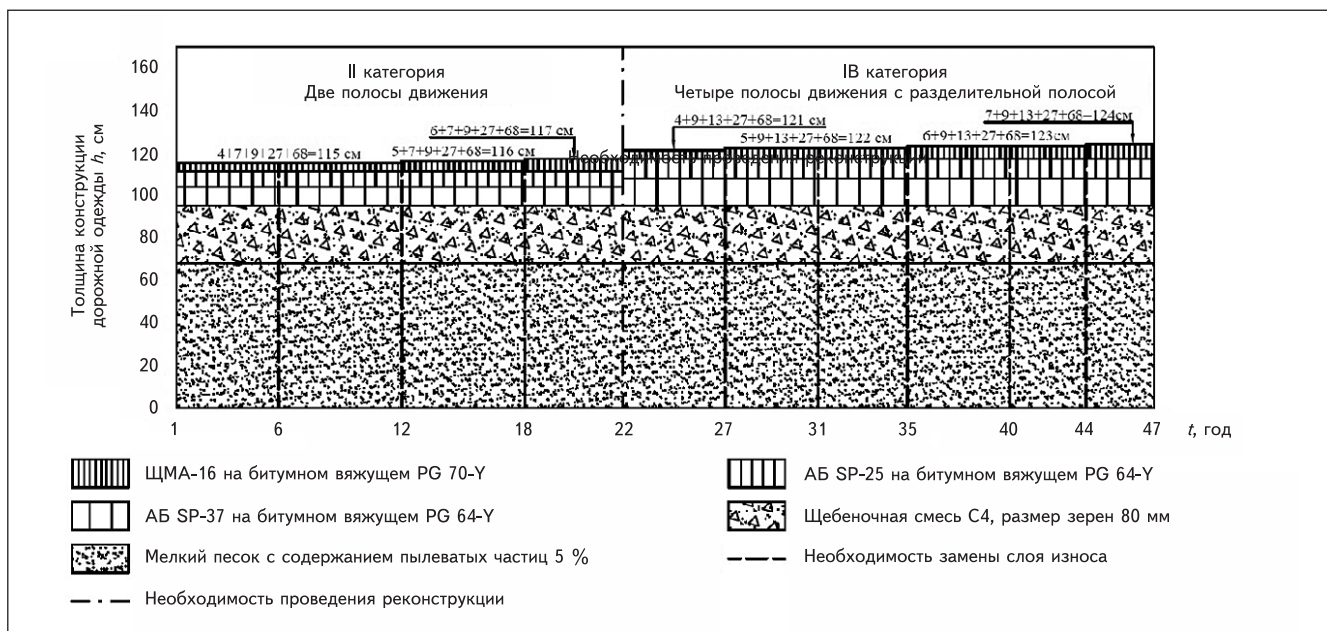


Рис. 2. Жизненный цикл автомобильной дороги «Подход от федеральной дороги А-181 «Скандинавия» до международного пропуска «Брусничное»

одежду необходимо рассчитать заново, определив расчетную интенсивность $N_{пр.АК-11,5}$ на одну полосу при уровне надежности $K_H = 0,98$. При этом следует заменить слои дорожной одежды, содержащие битумные вяжущие, не изменяя слои основания.

В период после первой реконструкции верхний слой покрытия восстанавливают 3 раза через 4,5 года и 2 раза — через 3,5 года.

Вторая реконструкция с увеличением количества полос до шести в обоих направлениях потребуется по достижении $N_{пр.л} = 40\ 000$ ед/сут на 47-й год эксплуатации, т. е. срок службы дорожной одежды на втором этапе $T_{кап.р2} = 25$ лет.

Общая протяженность жизненного цикла дорожной одежды в пределах двух реконструкций составляет 47 лет.

Изменение толщины слоев дорожной одежды на протяжении всего жизненного цикла приведено на рис. 2.

На этапе I до первой реконструкции на 22-й год эксплуатации общая толщина дорожной одежды составит 115–117 см. В связи с ростом интенсивности движения толщина верхнего слоя покрытия увеличивается в процессе ремонтов с 4 до 6 см. После первой реконструкции общая толщина дорожной одежды — 121 см (слои, содержащие битумное вяжущее, вновь устраиваемые на

этом этапе: 4 + 9 + 13 см). Толщина верхнего слоя покрытия увеличивается в процессе ремонтов с 4 до 7 см. В конце жизненного цикла общая толщина дорожной одежды составит 124 см. Полная разборка конструкции дорожной одежды с заменой ее на новую конструкцию целесообразна на 48-й год эксплуатации дороги.

Таким образом, в течение 47 лет эксплуатации на данной дороге (сначала II, а потом IV категории) можно поддерживать требуемые прочностные характеристики с заданным уровнем надежности, выполняя только замену содержащих битумное вяжущее слоев.

В ы в о д ы

1. Представлен теоретический аспект задачи проведения ремонтов с учетом характера повреждений, интенсивности их развития на основе совместного исследования прогнозирования жизненного цикла дорожной одежды и оценки срока службы конструкции, а также особенно-

стей контактирования и связей несущих элементов.

2. Предлагаемая методика конструирования и расчета дорожной одежды позволяет на стадии проектирования при разработке проекта планировать ремонты дороги в пределах жизненного цикла, равного как минимум двум срокам между капитальными ре-

монтами или реконструкцией дороги, производя только замену слоев, содержащих битумное вяжущее, не затрагивая остальных слоев дорожной одежды. Такой подход к проектированию нежесткой дорожной одежды обеспечит значительную экономию средств и материальных ресурсов.

С П И С О К И С Т О Ч Н И К О В / R E F E R E N C E S

1. Илиополов С. К., Селезнев М. Г., Углова Е. В. Динамика дорожных конструкций. Ростов-на-Дону : Юг, 2002. 260 с.
1. Iliopolov S. K., Seleznev M. G., Uglova E. V. *Dinamika dorozhnykh konstruksiy* [Dynamics of road structures]. Rostov-on-Donu, Yug Publ., 2002. 260 p. (In Russ.).
2. Завьялов М. А., Завьялов А. М. Термодинамическая теория жизненного цикла дорожного асфальтобетонного покрытия. Омск : СибАДИ, 2007. 283 с.
2. Zavyalov M. A., Zavyalov A. M. *Termodinamicheskaya teoriya zhiznennogo tsikla dorozhnogo asfal'tobefonnogo pokrytiya* [Thermodynamic theory of the life cycle of asphalt pavement]. Omsk, SibADI Publ., 2007. 283 p. (In Russ.).
3. Илиополов С. К., Углова Е. В. Долговечность асфальтобетонных покрытий в условиях роста динамических воздействий транспортных средств // Автомобильные дороги и мосты : обзорн. информ. М. : Информавтотор, 2007. Вып. 4. 84 с.
3. Iliopolov S. K., Uglova E. V. Durability of asphalt concrete coatings in conditions of growth of dynamic impacts of vehicles. *Avtomobil'nye dorogi i mosty* [Highways and bridges]. Moscow, Informavtodor Publ., 2007, iss. 4, 84 p. (In Russ.).
4. Илиополов С. К. Факторы разрушения. Энергетическое воздействие колес автомобилей на дорогу // Дороги России. 2002. № 4. С. 68–70.
4. Iliopolov S. K. Factors of destruction. Energy impact of car wheels on the road. *Dorogi Rossii*, 2002, no. 4, pp. 68–70. (In Russ.).
5. Lenzen M. Errors in conventional and input-output-based life-cycle inventories [Ошибки общепринятых жизненных циклов спецификаций, основанных на вводе-выводе]. *Journal of Industrial Ecology*, 2001, vol. 4, no. 4, pp. 127–148.
6. Trealar G. J., Love P. E. D., Faniran O. O., Iyer-Raniga U. A hybrid life cycle assessment method for construction [Гибридный жизненный цикл метода оценки строительства]. *Construction Management and Economics*, 2000, vol. 18, no. 1, pp. 5–9.
7. Mroueh U. M., Eskola P., Laine-Ylijoki J. et al. Life cycle assessment of road construction [Оценка жизненного цикла дорожного строительства]. *Finnish National Road Administration. Finnra Reports*, 2000, no. 17, pp. 15–90.
8. Stripple H. *Life cycle inventory of asphalt pavements* [Инвентаризация жизненного цикла асфальтобетонных покрытий]. Swedish Environmental Research Institute Ltd., 2000, 70 p.
9. Stripple H. *Life cycle assessment of road: a pilot study for inventory analysis* [Оценка жизненного цикла дороги: экспериментальное исследование для инвентаризационного анализа]. Swedish National Road Administration, IVL B 1210 E., 2001, 96 p.
10. Park K., Hwang Y., Seo S., Seo H. Quantitative assessment of environmental impacts on life cycle of highways [Количественная оценка воздействия окружающей среды на жизненный цикл автомобильных дорог]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2003, vol. 129, no. 1, pp. 25–31.
11. Treloar G. J., Love P. E. D., Crawford R. H. Hybrid life-cycle inventory for road construction and use [Гибридный жизненный цикл спецификации для строительства и эксплуатации дороги]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2004, vol. 130, no. 1, pp. 43–49.
12. Rangaraju P. R., Amirkhanian S., Guven Z. *Life cycle cost analysis for pavement type selection* [Анализ стоимости жизненного цикла для выбора типа дорожного покрытия]. South Carolina, Department of Transportation. FHWA-SC-08-01, 2008, pp. 13–26.
13. Huang Y., Bird R., Heidrich O. Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements [Разработка инструмента оценки жизненного цикла для строительства и технического обслуживания асфальтобетонных покрытий]. *Journal of Cleaner Production*, 2009, vol. 17, no. 2, pp. 283–296.
14. Углова Е. В. Моделирование деформирования нежестких дорожных конструкций при воздействии движущегося транспорта // Известия вузов. Строительство. 2009. № 3–4. С. 87–94.
14. Uglova E. V. Modeling of deformation of non-rigid road structures under the influence of moving transport. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*, 2009, no. 3–4, pp. 87–94. (In Russ.).
15. Носов В. П. Увеличение срока службы дорожных одежд – стратегическая задача дорожной науки // Автомобильные дороги. 2006. № 12. С. 81–86.
15. Nosov V. P. Increasing the service life of road clothes – a strategic task of road science. *Avtomobil'nye dorogi*, 2006, no. 12, pp. 81–86. (In Russ.).

УДК 628.237

doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.66-71

Влияние сооружений на сетях канализации на качество атмосферного воздуха

Анна Максимовна ТЕЛЯТНИКОВА, старший преподаватель, аспирантка, kononova.a.m@lan.spbgasu.ru

Святослав Викторович ФЕДОРОВ, кандидат технических наук, доцент, svyatoslavfedorov@mail.ru

Владимир Владимирович ШАБАЛИН, доктор биологических наук, профессор, vvshabalin@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ),
190005 Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

Аннотация. Рассмотрена проблема загрязнения воздушного пространства выбросами газов от сооружений на канализационной сети. В качестве объектов наблюдения были выбраны действующие камеры гашения напора, перепадные колодцы и канализационные насосные станции, которые располагаются в городской среде. В ходе исследования был выполнен мониторинг канализационных газов непосредственно у обследуемых сооружений для фиксации функции источника, а также в воздушном пространстве рядом с сооружениями. На всех объектах был зафиксирован постоянный выход канализационных газов в городскую среду. Измерения в пространстве выполнялись в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Для размещения приборов выбирались точки по основному направлению ветра и по перпендикуляру к оси факела в точке выброса. В результате измерений была получена концентрация сероводорода, метана, метилмеркаптана и аммиака. На основании ее сравнения со значениями предельно-допустимой концентрации были оценены зоны загрязнения для каждого типа сооружений. Рассмотренный подход позволяет установить границы санитарно-защитной зоны или обосновать применение оборудования для газоочистки на проблемных сооружениях канализационной сети.

Ключевые слова: сероводород, метан, метилмеркаптан, аммиак, мониторинг, канализационная насосная станция, камера гашения напора, перепадной колодец, санитарно-защитная зона, зона загрязнения

Для цитирования: Телятникова А. М., Федоров С. В., Шабалин В. В. Влияние сооружений на сетях канализации на качество атмосферного воздуха // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 5. С. 66–71.

doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.66-71

THE INFLUENCE OF STRUCTURES ON SEWER NETWORKS ON THE QUALITY OF ATMOSPHERIC AIR

Anna M. TELYATNIKOVA, kononova.a.m@lan.spbgasu.ru

Svyatoslav V. FEDOROV, svyatoslavfedorov@mail.ru

Vladimir V. SHABALIN, vvshabalin@mail.ru

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-ya Krasnoarmeyskaya ul., 4,
St. Petersburg 190005, Russian Federation

Abstract. The problem of air pollution by gas emissions from structures on the sewer network is considered. Active chambers of dissipation of head, drop manholes and sewage pumping stations, which are located in an urban environment, were selected as objects of observation. During the study, sewer gases were monitored directly at the surveyed structures to fix the source function, as well as in the airspace next to the structures. Constant discharge of sewer gases into the urban environment was recorded at all facilities. Measurements in space were carried out in the horizontal and vertical planes. For the location of the devices, points were selected along the main wind direction and perpendicular to the axis of the torch at the ejection point. As a result of measurements, concentrations of hydrogen sulfide, methane, methyl mercaptan and ammonia were obtained. Based on their comparison with the values of the maximum permissible concentration, pollution zones for each type of structures were estimated. The considered approach makes it possible to establish the boundaries of the sanitary protection zone or to justify the use of gas purification equipment on problematic sewer network structures.

Keywords: hydrogen sulfide, methane, methyl mercaptan, ammonia, monitoring, sewage pumping station, head dissipation chamber, drop well, sanitary protection zone, pollution zone

For citation: Telyatnikova A. M., Fedorov S. V., Shabalin V. V. The Influence of Structures on Sewer Networks on the Quality of Atmospheric Air. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2022, no. 5, pp. 66–71. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.66-71

Введение

Современное общество уделяет большое внимание экологиче-

ской обстановке городской среды. Уровень загрязненности городов достиг максимальных зна-

чений. Источниками загрязнения, как правило, являются промышленные предприятия, автотранс-

порт, теплоэнергетический комплекс. К этому списку также можно добавить объекты канализационной сети. Для таких сооружений не проводится оценка воздействия, однако их вклад в загрязнение атмосферного воздуха может быть существенным.

Выделение канализационных газов в городскую среду оказывает органолептическое и токсическое воздействие на жителей [1, 2], негативно влияя на качество среды обитания. В результате ухудшается самочувствие и снижается трудоспособность горожан [3]. В связи с этим необходимо вести постоянный контроль за потенциально опасными сооружениями с точки зрения выбросов канализационных газов, производить оценку размеров зоны загрязнения и при необходимости предусматривать меры по устранению вредных примесей.

Повышенное выделение канализационных газов происходит в насосных станциях (КНС), камерах гашения напора (КГН), перепадных колодцах, водосливах и быстротоках [4, 5]. Эти сооружения характеризуются повышенной турбулизацией потока, которая интенсифицирует процессы высвобождения газов в подводящее пространство канализационной сети. Наиболее часто из канализационных сетей в атмосферный воздух попадает газовоздушная смесь, имеющая в своем составе сероводород (H_2S), метан (CH_4), метилмеркаптан (CH_3SH) и аммиак (NH_3) [6].

Контроль качества воздушной среды регулируют следующие документы. Для присвоения объекту статуса источника загрязнения атмосферы (ИЗА) необходимо руководствоваться распоряжением правительства РФ от 8 июля 2015 г. № 1316-р «Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регу-

лирования в области охраны окружающей среды». Нормирование концентрации вредных веществ в приземных слоях атмосферы выполняется в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Для инженерного расчета процессов распространения выбросов в воздушном пространстве используют методики, описанные в приказе Минприроды России от 6 июня 2017 г. № 273 «Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе», а также подходы, изложенные в методическом пособии АО «НИИ Атмосфера» по расчету, нормированию и контролю выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух.

Рассмотренные документы не позволяют произвести расчет загрязнения воздушной среды от источников на канализационной сети. Представленные в них методы дают большую погрешность при оценке поля концентрации канализационных газов вблизи объекта.

В вопросах защиты атмосферного воздуха используется понятие санитарно-защитной зоны, в границах которой предполагается достижение предельно допустимой концентрации (ПДК), установленной для населенных мест, по всем загрязняющим веществам. Нормативы по размерам зон представлены в СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов» и не содержат требований для объектов системы канализации. В соответствии с этим необходима разработка методики, позволяющей оценивать размеры зоны загрязнения в зависимости от про-

изводительности сооружения и состава стока.

Проблема образования и выделения канализационных газов достаточно широко рассмотрена в современной научной литературе. Имеются работы, посвященные мониторингу концентрации газов в подводящем пространстве канализационных сетей и сооружений [7, 8]. В данных работах рассмотрена установка приборов внутри самотечной сети и фиксация основных канализационных газов. Также интерес исследователей проявляется к сетям с напорным движением сточных вод, поскольку в них наиболее интенсивно протекают процессы образования газов [9]. Сооружения разгрузки напорного потока являются дегазаторами сероводорода в самотечных сетях. В связи с этим представляет интерес работа [10], в которой выполняется анализ метода аэрации напорного потока сточных вод на выделение сероводорода.

Отдельное направление — это оценка антропогенного воздействия сооружений канализации на окружающую среду. В работах [11, 12] рассмотрено измерение сероводорода в атмосферном воздухе с целью оценки влияния объектов канализации на экологическую обстановку.

Изучение фазового перехода сероводорода из жидкой среды в воздушную обязательно должно сопровождаться определением его концентрации в сточной воде. В качестве примера могут служить работы [13–15]. Также значительное внимание уделяется изучению массообменных процессов [16–18]. Важное место занимают исследования, посвященные оценке влияния на интенсивность выделения газа гидравлических характеристик потока [19], физических и климатических условий [20], а также состава сточной жидкости [21].

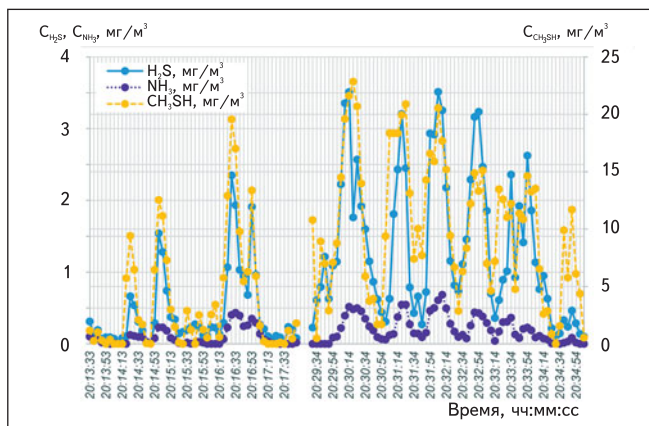


Рис. 1. Результаты записи функции источника для перепадного колодца в г. Череповец

Материалы и методы

Основной целью данного исследования стала оценка зоны загрязнения для сооружений системы канализации. Основными задачами являются: натурное определение поля концентрации загрязняющих газов; измерение скорости диктующего направления ветра; определение границ зоны загрязнения для реальных объектов разного типа.

Выбор объектов исследования осуществлялся по следующим критериям:

- вид сооружения (предпочтительно КНС, КГН, перепадной колодец);
- производительность сооружения;
- территориальное местоположение (общественные места, доступные для контакта);
- вид транспортируемых сточных вод (хозяйственно-бытовой, промышленный стоки).

Для мониторинга были выбраны следующие объекты:

- КНС-2 (К-1), г. Мурино;
- КНС ЖК «Светлановский», пос. Бугры;
- КГН в парке Победы, г. Череповец;
- перепадной колодец, пр. Металлистов, г. Череповец.

Для фиксации концентрации канализационных газов применялся газоанализатор «Эколаб АР», оснащенный датчиками для

измерения H_2S , CH_4 , CH_3SH и NH_3 (см. таблицу).

Для измерения скорости ветра применялся многофункциональный прибор Testo 435-4 совместно с зондом-крыльчаткой диаметром 60 мм в качестве анемометра (см. таблицу).

Измерение концентрации осуществлялось в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Для расположения приборов выбирались точки по основному направлению ветра с шагом 1 м и по перпендикуляру к оси факела в точке выброса. В местах установки прибора также выполнялись измерения на различных высотах: 0,5; 1; 1,5 и 2 м. Измерение скорости ветра выполнялось совместно с измерением концентрации. Фиксация концентрации в каждой точке выполнялась непрерывно в течение 2 мин. Данные наблюдений записывались в память приборов. В процессе обработки результатов данные осреднялись, и средние значения использовались для дальнейшего анализа.

Результаты и обсуждения

При выполнении измерений первоначально фиксировалась функция источника. На рис. 1 представлен пример записи функции источника для перепадного колодца, где наблюдается пульсация концентрации загряз-

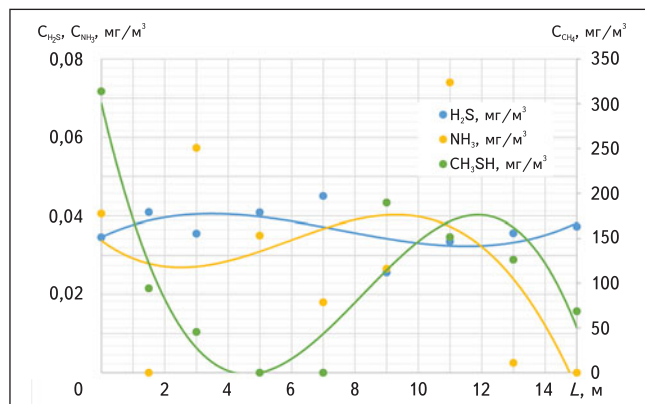


Рис. 2. Средняя концентрация канализационных газов, зафиксированных по оси факела выброса от КНС в г. Мурино

няющих газов, что связано со спецификой работы сооружения. В результате падения жидкости в водобойный колодец происходит выделение газов, которые в дальнейшем частично покидают подпольное пространство через неплотности люка. За период наблюдения у люка данного сооружения были зафиксированы следующие максимальные концентрации газов: $C_{H_2S}^{max} = 3,51 \text{ мг/м}^3$ (превышение ПДК_{м.р} в 439 раз); $C_{NH_3}^{max} = 0,69 \text{ мг/м}^3$ (превышение ПДК_{м.р} в 3,5 раза), $C_{CH_4S}^{max} = 22,83 \text{ мг/м}^3$ (превышение ПДК_{м.р} в 3805 раз). Выбросы метана отсутствовали. Средняя скорость ветра при проведении измерений составляла 0,3 м/с.

Аналогичные данные были получены для объекта КГН в парке Победы. Люк КГН располагается на газоне, на расстоянии 30 м от границы парковой дорожки. Функция источника имела схожий характер с предыдущим объектом. За период наблюдения (с 13:51 до 14:39) были зафиксированы следующие максимальные концентрации: $C_{H_2S}^{max} = 1,15 \text{ мг/м}^3$ (превышение ПДК_{м.р} в 144 раза); $C_{CH_4}^{max} = 1014,9 \text{ мг/м}^3$ (превышение ОБУВ в 21 раз); $C_{CH_4S}^{max} = 5,86 \text{ мг/м}^3$ (превышение ПДК_{м.р} в 977 раз). Выбросы аммиака отсутствовали. Средняя скорость ветра – 0,67 м/с.

Следующими объектами на-

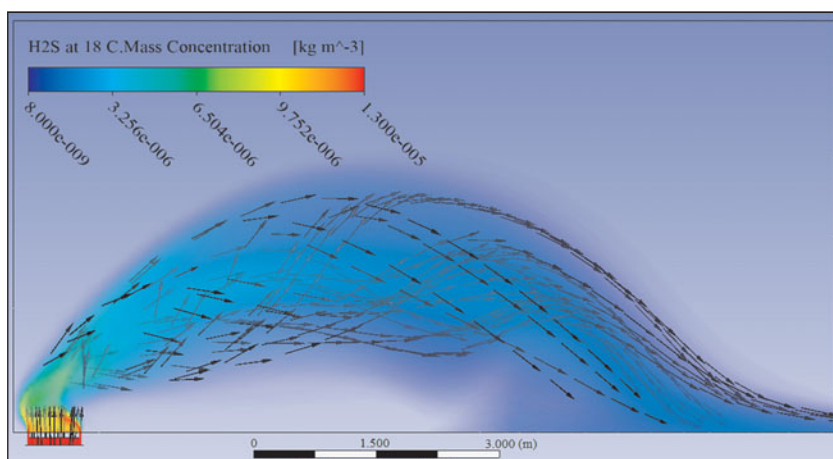


Рис. 3. Результаты моделирования выбросов сероводорода из люка канализационного сооружения в ПК ANSYS CFX

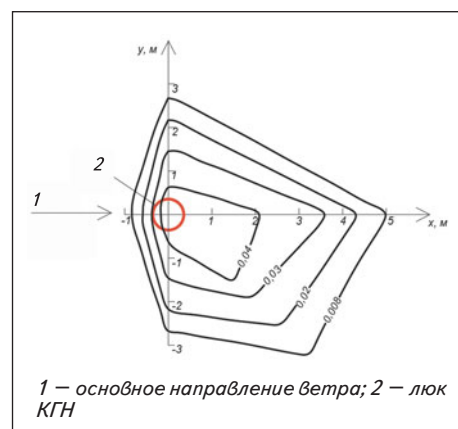


Рис. 4. Изолинии концентрации сероводорода у люка КГН в парке Победы в г. Череповце

блюдения были канализационные насосные станции, расположенные в пос. Бугры (на парковке жилого комплекса) и в г. Мурино (на разделительной полосе проезжей части). Насосные станции являются комплектными и перекачивают сточные воды от жилых кварталов. Доступ к люковому пространству на объектах был ограничен, поэтому измерения концентрации осуществлялись рядом с ограждением, максимально близко к вентиляционной трубе. Максимальные концентрации для КНС в пос. Бугры составляли: $C_{H_2S}^{max} = 0,11$ мг/м³ (превышение ПДК_{м,р} в 14 раз); $C_{CH_4}^{max} = 743,21$ мг/м³ (превышение ОБУВ в 15 раз), выбросы аммиака и метилмеркаптана отсутствовали, а средняя скорость ветра составляла 1,9 м/с.

Для КНС в г. Мурино были получены следующие максимальные значения: $C_{H_2S}^{max} = 0,13$ мг/м³ (превышение ПДК_{м,р} в 16 раз); $C_{CH_4}^{max} = 1058,8$ мг/м³ (превышение ОБУВ в 21 раз); $C_{CH_4S}^{max} = 0,32$ мг/м³ (превышение ПДК_{м,р} в 53 раза). Выбросы аммиака отсутствовали, средняя скорость ветра — 1,65 м/с. Отметим, что поскольку точки фиксации находились на некотором расстоянии от выпускающего отверстия вентиляционной трубы, то следует полагать, что в зоне люка значения концен-

Характеристики применяемого оборудования

Наименование прибора	Определяемый показатель	Диапазон измерений	Пределы допускаемой основной погрешности
Газоанализатор Эколаб АР	Концентрация H ₂ S	0,004–200 мг/м ³	± 20 %
	Концентрация CH ₄	25–140000 мг/м ³	
	Концентрация NH ₃	0,02–400 мг/м ³	
	Концентрация CH ₃ SH	0,003–16 мг/м ³	
Многофункциональный прибор Testo 435-4 и зонд-крыльчатка диаметром 60 мм	Скорость ветра	0,25–20 м/с	± (0,1 м/с + 1,5 % от измеренного значения)

трации существенно выше. Высокие концентрации в КНС обусловлены тем, что они являются конечными сооружениями на самотечной сети, поэтому образовавшиеся и выделившиеся при транспортировке газы, за счет увлекающей способности потока, поступают в приемные резервуары станций. Также дополнительной дегазации потока способствует работа насосов. Поэтому данные сооружения потенциально опасны с точки зрения единовременного выхода порций газовой смеси с критически высокой концентрацией.

Далее перейдем к результатам исследования по фиксации данных в воздушном бассейне рядом с сооружениями. На рис. 2

представлены графики средней концентрации H₂S, CH₄ и CH₃SH, получаемой по оси факела выброса от КНС в г. Мурино. Средняя концентрация для каждой контрольной точки определялась на основании данных, полученных на разных высотах. Причем по мере удаления от источника наблюдается общая тенденция к снижению концентрации, однако этот процесс проявляется медленно и сопровождается локальным ростом значений. Концентрация метана и метилмеркаптана на расстоянии до 15 м достигает допустимых значений. Для сероводорода размеры зоны загрязнения составили более 15 м, ПДК_{м,р} на границе измерений превышена в 5 раз.

Пульсация концентрации в контрольных точках является результатом специфики струйного потока и непостоянства массового расхода выбрасываемых газов. Поскольку газоздушная смесь имеет более высокую плотность по сравнению с окружающей средой, то образующаяся струя имеет баллистическую траекторию. Данный вид потока был смоделирован в ПК ANSYS CFX и представлен на рис. 3, где показана концентрация сероводорода и векторное поле потока газа, выходящего из люка в окружающую среду. Первоначально струя поднималась вверх за счет избыточного давления в канализационной сети, а затем опускалась вследствие более высокой плотности.

Аналогичные результаты были получены и по другим объектам. Для КНС в пос. Бугры на расстоянии 10 м было зафиксировано превышение ПДК_{м.р} по сероводороду в 3,5 раза ($C_{H_2S} = 0,0279$ мг/м³). Для КГН в парке Победы на расстоянии 5 м по оси факела была зафиксирована концентрация только сероводорода $C_{H_2S} = 0,007$ мг/м³, не превышающая допустимого значения для городской черты. Остальные газы отсутствовали. Около перепадного колодца на пр. Металлистов в пределах 5 м также не удавалось достичь снижения концентрации сероводорода до допустимых значений. Концентрация сероводорода составила $C_{H_2S} = 0,0283$ мг/м³, что также превы-

шает ПДК_{м.р} в 3,5 раза. Остальные газы отсутствовали.

Для оценки площади загрязнения может быть построено поле концентрации канализационного газа на местности. В качестве примера на рис. 4 представлено отображение концентрации при помощи изолиний для КГН в парке Победы, откуда видно, что наибольшие размеры пятно загрязнения имеет по направлению ветра и составляет 5 м. По обе стороны от факела выброса зона загрязнения составляет по 2,5 м. Общая площадь пятна загрязнения равна 21,3 м².

Выводы

1. На основании выполненного исследования были получены размеры зон загрязнения для исследуемых объектов. Для обследованных комплектных насосных станций размеры зон загрязнения превышали 10 м по основному направлению ветра. Значения ПДК_{м.р} для сероводорода были превышены в 3,5–5 раз. Под влияние этих зон попадают территории общественного пространства (пешеходная зона, тротуары, жилые дома, парковка). Полученные результаты свидетельствуют о том, что данные сооружения должны быть снабжены оборудованием для газоочистки либо системами вентиляции, позволяющими организовать выброс загрязняющих веществ в места, недоступные для людей.

2. Результаты по перепадным колодцам также показали превышение ПДК, однако в силу метеорологических условий и других характеристик источника зоны загрязнения были незначительными и ориентировочно составляли 5 м. В случае с КГН в парке Победы, где объект находится в зеленой зоне, недоступной для посетителей парка, фактически не требуются какие-либо дополнительные мероприятия по задержанию газов. Для перепадного колодца на пр. Металлистов, располагающегося в промышленной зоне, следует предусмотреть мероприятия по устранению выбросов канализационных газов, поскольку зона его влияния затрагивает территорию общественного пространства.

3. Прделанная работа показала, что данная проблема весьма актуальна для городской среды и ее решение требует комплексного подхода. Необходимо анализировать работу канализационной сети, выявлять наиболее проблемные сооружения и проводить мониторинг окружающей среды. На основании этого в дальнейшем дается заключение о размерах зоны загрязнения и ее возможном наложении на территорию общественного пространства. Такие мероприятия позволят установить границы санитарно-защитной зоны или обосновать применение оборудования для газоочистки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Wang B., Sivret E., Parcsi G. et al. Is H₂S a suitable process indicator for odour abatement performance of sewer odours? [Является ли H₂S подходящим технологическим индикатором эффективности борьбы с запахами канализационных стоков?]. *Water Science and Technology: Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2014, no. 69, pp. 92–98.
2. Austigard A., Svendsen K., Heldal K. Hydrogen sulphide exposure in waste water treatment [Воздействие сероводорода при очистке сточных вод]. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 2018, no. 13, pp. 10–20.
3. Vokowa A. N. The Review of the Odour Legislation [Пересмотр законодательства по запахам]. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2010, no. 20, pp. 492–511.
4. Лейбович Л. И., Пацурковский П. А. Моделирование динамики поступления сероводорода в окружающую среду при работе насосов канализационных насосных станций // Вестник ХНАДУ. 2016. № 72. С. 176–181.

4. Leybovich L. I., Patsurkovskiy P. A. Simulation of dynamics hydrogen sulfide penetration in to the environment during the operation of pumps of sewage pumping stations. *Vestnik KhNADU*, 2016, no. 72, pp. 176–181. (In Russ.).
5. Guo Sh., Qian Yu, David Zh et al. Effects of drop structures and pump station on sewer air pressure and hydrogen sulfide: field Investigation [Влияние перепадных сооружений и насосной станции на давление воздуха в канализации и сероводород: натурные исследования]. *Journal of Environmental Engineering (United States)*, 2018, no. 144, pp. 1–9.
6. Hvitved-Jacobsen T., Vollertsen J., Nielsen A. H. *Sewer processes. Microbial and chemical process engineering of sewer networks* [Процессы в канализации. Микробиологические и химические процессы инженерных канализационных сетей]. Miami: Taylor & Francis Group, LLC, 2013. 399 p.
7. Ventura Matos R., Ferreira F., Gil C., Saldanha Matos J. Understanding the effect of ventilation, intermittent pumping and seasonality in hydrogen sulfide and methane concentrations in a coastal sewerage system [Понимание влияния вентиляции, периодической откачки и сезонности концентрации сероводорода и метана на работу прибрежной канализационной системы]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, no. 26, pp. 3404–3414.
8. Перминов Н. А., Васильев В. М., Столбихин Ю. В. [и др.] Геотехнические и технологические аспекты обеспечения безопасности тоннельных коллекторов в условиях слабых грунтов Санкт-Петербурга // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 11. С. 19–27.
8. Perminov N. A., Vasil'ev V. M., Stolbikhin Yu. V. et al. Geotechnical and technological aspects of ensuring the safety of tunnel sewers under the conditions of loose ground of Saint-Petersburg. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*, 2018, no. 11, pp. 19–27. (In Russ.).
9. Matias N., Ventura Matos R., Ferreira F. et al. Release of hydrogen sulfide in a sewer system under intermittent flow conditions: the Ericeira case study, in Portugal [Выброс сероводорода в канализационную систему в условиях прерывистого потока: тематическое исследование в Эрисейре, Португалия]. *Water Science and Technology*, 2017, no. 75, pp. 1702–1711.
10. Garcna J., Viguera-Rodriguez A., Castillo L., Carrillo J. Evaluation of sulfide control by air-injection in sewer force mains: field and laboratory study [Оценка контроля сульфидов путем нагнетания воздуха в канализационные магистрали: натурные и лабораторные исследования]. *Sustainability*, 2017, no. 9, pp. 402–420.
11. Churchill P., Elmer D. Hydrogen sulfide odor control in wastewater collection systems [Контроль запаха сероводорода в системах сбора сточных вод]. *Newea Journal*, 1999, vol. 33, no. 1, pp. 57–63.
12. Waawain M., Al-Mamun Md. A., Omidvarborna H., Al-Jabri A. Assessment of hydrogen sulfide emission from a sewage treatment plant using AERMOD [Оценка выбросов сероводорода с очистных сооружений с использованием AERMOD]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, no. 189, pp. 262–272.
13. Despot D., Pacheco M., Barjenbruch M. Comparison of online sensors for liquid phase hydrogen sulphide monitoring in sewer systems [Сравнение онлайн-датчиков для мониторинга жидкофазного сероводорода в канализационных системах]. *Water*, 2021, no. 13, pp. 1876–1893.
14. Ручкина О. И. Изменение концентрации сульфидов в хозяйственно-бытовых сточных водах в процессе транспортирования // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2019. № 3. С. 138–149.
14. Ruchkinova O. I. Change of sulphide concentration in household wastewater during transportation. *Vestnik PNIPIU. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika*, 2019, no. 3, pp. 138–149. (In Russ.).
15. Вильсон Е. В. Исследования в области удаления восстановленных соединений серы из сточных вод // Наукоедение. 2013. № 3. С. 1–10.
15. Vil'son E. V. Research in the field of removal of reduced sulfur compounds from wastewater. *Naukovedenie*, 2013, no. 3, pp. 1–10. (In Russ.).
16. Yongsiri Ch., Vollertsen J., Rasmussen M., Hvitved-Jacobsen Th. Air-water transfer of hydrogen sulfide: an approach for application in sewer networks [Перенос сероводорода из воздуха в воду: подход для применения в канализационных сетях]. *Water Environment Research: a Research Publication of the Water Environment Federation*, 2004, no. 76, pp. 81–88.
17. Carrera L., Springer F., Lipeme Kouyi G., Buffiere P. A review of sulfide emissions in sewer networks: overall approach and systemic modelling [Обзор выбросов сульфидов в канализационных сетях: общий подход и системное моделирование]. *Water Science and Technology*, 2016, no. 73, pp. 1231–1242.
18. Jung D., Hatrait L., Gouello J. et al. Emission of hydrogen sulfide at a water fall in sewer: study of main factors affecting H₂S emission and modelling approaches [Выброс сероводорода при перепаде в канализации: изучение основных факторов, влияющих на выброс H₂S, и подходов к моделированию]. *Water Science and Technology*, 2017, no. 76, pp. 428–439.
19. Федоров С. В., Васильев В. М., Клементьев М. Н. Исследование газовыделения на участке канализационной сети // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 5. С. 54–59.
19. Fedorov S. V., Vasil'ev V. M., Klement'ev M. N. Study of gas evolution in a sewer section. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*, 2019, no. 5, pp. 54–59. (In Russ.).
20. Eijo-Rio E., Petit-Boix A., Villalba G. et al. Municipal sewer networks as sources of nitrous oxide, methane and hydrogen sulphide emissions: a review and case studies [Муниципальные канализационные сети как источники выбросов закиси азота, метана и сероводорода: обзор и тематические исследования]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2015, no. 3, pp. 2084–2094.
21. Rudelle E., Vollertsen J., Hvitved-Jacobsen T., Nielsen A. Modeling anaerobic organic matter transformations in the wastewater phase of sewer networks [Моделирование анаэробных превращений органического вещества в водной фазе канализационных сетей]. *Water Science and Technology*, 2012, no. 52, pp. 201–208. ■

УДК 628.292

doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.72-78

Предотвращение заиливания осадком ливневой насосной станции

Святослав Викторович ФЕДОРОВ, кандидат технических наук, доцент, svyatoslavfedorov@mail.ru

Юрий Вячеславович СТОЛБИХИН, кандидат технических наук, доцент, зам. декана по учебной работе, stolbikhin@bk.ru

Владимир Владимирович ШАБАЛИН, доктор биологических наук, профессор, vvshabalin@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ),
190005 Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

Аннотация. В ходе пусконаладочных работ новой канализационной насосной станции на промышленном предприятии служба эксплуатации столкнулась с проблемой сильного заиливания резервуара станции песком, поступающим из дождевой сети предприятия. Концентрация песка превышала допустимую для основных насосов, что приводит к быстрому износу рабочего колеса и внутренних полостей агрегата, а также к истиранию напорного трубопровода. Для решения обозначенной проблемы была предложена направляющая перегородка внутри резервуара и размещение пескового насоса, перехватывающего поток пескопulpы при движении воды к основным насосам. С помощью математического моделирования резервуара насосной станции исследовали два варианта – с перегородкой и без. В качестве результатов моделирования были получены поля распределения объемной доли пескопulpы на дне и в приемке резервуара. Наличие перегородки позволило исключить накопление песка в резервуаре и его поступление в насосный приемок с высокой концентрацией и перенаправить поток к насосам с торцевой стороны приемка, где была выделена отдельная секция под песковой насос. Таким образом, движение воды и песка перехватывалось песковым насосом перед подходом к основным агрегатам. Данное решение позволило защитить насосы с минимальными затратами в сжатые сроки.

Ключевые слова: насосная станция, промышленное предприятие, дождевая сеть, песок, пескопulpа, моделирование

Для цитирования: Федоров С. В., Столбихин Ю. В., Шабалин В. В. Предотвращение заиливания осадком ливневой насосной станции // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 5. С. 72–78.

doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.72-78

PREVENTION OF THE STORMWATER PUMPING STATION SILTING-UP

Svyatoslav V. FEDOROV, svyatoslavfedorov@mail.ru

Iurii V. STOLBIKHIN, stolbikhin@bk.ru

Vladimir V. SHABALIN, vvshabalin@mail.ru

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-ya Krasnoarmeyskaya ul., 4,
St. Petersburg 190005, Russian Federation

Abstract. During the commissioning of a new sewage pumping station at an industrial enterprise, the operation service encountered the problem of heavy silting-up of the station storage tank with sand coming from the rain network of the enterprise. Concentration of sand exceeded permissible for the main pumps, which leads to rapid wear of the impeller and the internal cavities of the unit, as well as to abrasion of the pressure pipeline. During the start-up and commissioning of the pumping station, the station storage tank was filled with water from the network and then its complete pumping out by the pumps was performed. After that, in the tank, at the maintenance site, the bottom surfaces, the sump pit and pumps were visually examined. To solve this problem, a guide partition was proposed inside the tank and the placement of a sand pump intercepting the flow of sand-pulp when water moves to the main pumps. Using mathematical modeling of the pumping station tank, two variants, with and without a partition, were investigated. As simulation results, the distribution fields of the volume fraction of the sand-pulp at the bottom and in the sump pit of the storage tank were obtained. The presence of a partition made it possible to exclude the accumulation of sand in the tank and its entry into the pumping pit with a high concentration and redirect the flow to the pumps from the end side of the pit, where a separate section was allocated for the sand pump. Thus, the movement of water and sand was intercepted by a sand pump before approaching the main units. This solution made it possible to protect pumps with minimal costs in a short time.

Keywords: pumping station, industrial enterprise, rain network, sand, sand-pulp, modelling

For citation: Fedorov S. V., Stolbikhin Iu. V., Shabalin V. V. Prevention of the Stormwater Pumping Station Silting-Up. *Proyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2022, no. 5, pp. 72–78. (In Russ.).

doi: 10.33622/0869-7019.2022.05.72-78

Введение

Современные системы водоотведения поверхностного стока обязательно включают использование насосных станций. Как правило, эти станции находятся в конце самотечной сети и перекачивают сток на очистные сооружения либо играют роль повысительных для одновременного подъема сточных вод. Эффективная работа данных сооружений определяет надежность системы водоотведения в целом. Остановка насосной станции по каким-либо причинам может привести к возникновению различных чрезвычайных ситуаций в городской среде. Фактор надежности очень актуален для систем водоотведения, обеспечивающих удаление поверхностного стока с территории промышленных предприятий. Аварии, вызывающие подтопление территорий, могут привести к непоправимым последствиям, таким как повреждение технологического оборудования, порча продукта, получаемого на производстве.

Как показывает опыт эксплуатации, остановку насосных станций вызывают, как правило, перебои электроснабжения, разрушение целостности трубопроводов и повреждения их арматуры, заиливание напорной сети [1], механическая поломка насосных агрегатов, в том числе вследствие заклинивания рабочего колеса и абразивного износа внутренних полостей насосов [2] и т. д.

В настоящее время один из негативных факторов, оказывающих влияние на работу канализационной насосной станции (КНС), — поступление избыточного количества осадка и песка из канализационных сетей [3]. Безусловно, насосные агрегаты, которые предполагается использовать в системах перекачки сточных вод, рассчитаны на присутствие частиц песка и других механических примесей, в том чис-



Рис. 1. Территория промышленного предприятия

ле достаточно крупных, сопоставимых с размером проточной части корпуса насоса.

Однако исходя из опыта эксплуатации отметим, что на насосную станцию могут поступать экстремально высокие расходы донных наносов, приносимых в приемный резервуар насосной станции из лотка дождевого коллектора. Такие расходы, поступая в насосный приямок, превращают перекачиваемую жидкость в концентрированную пескопульпу, которая вызывает сбои в работе насоса и увеличивает его износ.

Поступление в дождеприемные колодцы поверхностного стока с большим содержанием взвешенных частиц обычно объясняется следующими причинами: часть территории предприятия может быть неблагоустроенной, широко используются грунтовые временные дороги, в ходе проведения каких-либо ремонтных работ не выполняется мойка колес автотранспорта.

На территории промышленного предприятия отмечается большое количество песка на проезжей части в результате движения загрязненного автотранспорта (рис. 1). После прохождения сильных дождей поверхностный сток смывает взвешенные вещества в дождеприемные колодцы. Одним из крупных источников загрязнения поверхностного стока взвешенными веществами становятся грунтовые поверхности, которые во время сильных дож-

дей подвержены эрозии [4]. По российским стандартам, в колодцах предусматривается отстойная часть (до 0,5 м), но, несмотря на это, данная конструкция колодцев не позволяет эффективно снижать концентрацию взвеси в канализационной сети. Как правило, отстойная часть быстро забивается песком, и не выполняется ее регулярная очистка. Поэтому взвесь напрямую поступает в сеть и волнообразно, подобно донным наносам в реках, сползает вниз по течению к насосной станции [5–7]. Во время прохождения сильных дождей песок, задержанный в отстойной части дождеприемников, может также взмучиваться и поступать в канализационную сеть [8].

Важно отметить, что источники загрязнения в основном носят временный характер и имеют место на этапе развития предприятия, когда ведется активное строительство или реконструкция. Со временем интенсивность поступления загрязнений может как повышаться, так и понижаться. В связи с этим применяемые технические мероприятия по очистке сточных вод должны обладать невысокой стоимостью, быть легко монтируемыми и демонтируемыми.

Авторы данной статьи столкнулись с такой проблемой при проектировании канализационной насосной станции и ее введении в эксплуатацию на промышленном предприятии в Ленинградской обл. Насосная станция представляет собой заглубленный приемный резервуар (16×16×6,4 м) с установкой погружных насосных агрегатов в приямок (2×6×2,9 м) (рис. 2). Дно резервуара имеет уклон 1 % к приямку. Подводящий самотечный трубопровод — с внутренним диаметром 1,2 м. В месте его подключения к резервуару устроена корзина для извлечения крупного мусора. В резервуаре предусмотрено устройство

мешалки для взмучивания осадка в момент перекачки стока. В приемке запроектирована установка трех насосных агрегатов фирмы KSB KRTK 150-400/954UNG-S (расход — 510 м³/ч, напор — 50 м). Из них два насоса рабочие, один — резервный.

Стальные напорные линии от насосных агрегатов диаметром 250 мм объединяются в общий трубопровод диаметром 350 мм внутри станции. За пределами резервуара напорный трубопровод переходит на полиэтиленовый трубопровод диаметром 400 мм, по которому вода транспортируется до главной насосной станции предприятия. Общая протяженность напорного водовода составляет 1,2 км. На напорной линии каждого насоса предусмотрена установка обратного клапана и задвижки. Для обслуживания запорной и предохранительной арматуры внутри резервуара есть специальная площадка. Для спуска обслуживающего персонала на площадку и в приямок в перекрытии резервуара устроены проемы и лестницы.

Включение или выключение насосов и мешалки предусматривается по уровням воды в резервуаре. Максимальному уровню воды соответствует положение лотка подводящего коллектора, высота которого над дном резервуара равна 2,1 м. Объем воды, соразмерный данному уровню, составляет 540 м³. При максимальном притоке дождевых вод (1020 м³/ч), приводящем к накоплению такого объема, в работу включается два насоса. При меньших расходах возможна работа одного насоса с использованием частотного регулирования.

После завершения строительно-монтажных работ были выполнены мероприятия по пусконаладке станции. Было отмечено поступление в резервуар из дождевой сети предприятия большого количества песка. Концентра-

ция взвеси в сточных водах превышала 3 г/л, что недопустимо для эксплуатации данных насосов. Сокращение количества взвешенных веществ вместе с отсутствием завихрений потока со стороны всасывания насосов — залог долгой и эффективной работы агрегатов [9–11].

Для защиты насосных агрегатов от механического повреждения песком требуется устройство очистного сооружения [9]. Встречаются решения, когда песколовку размещают на подводящем канале. Песколовка представляет собой успокоительный резервуар, в котором происходит интенсификация осаждения. Интересное решение приведено в работе [12], в котором песколовка реализуется в виде накопительного приемка в основном русле для задержки крупного песка, в то время как остальной поток движется по параллельному ответвлению.

В мировой практике с целью экономии ресурсов очистка организуется непосредственно в приемном резервуаре станции [13, 14]. Как правило, это осуществляется с помощью выделения части резервуара под очистную секцию, которая обеспечивает осаждение и удаление частиц песка. В нашей ситуации станция уже была построена, и существенные изменения по конструкции резервуара не могли быть внесены. При этом вопрос организации очистки необходимо было решать в условиях минимальных финансовых затрат. На практике очень часто возникают ситуации, когда в ходе эксплуатации требуется корректировка проектных решений с целью оптимизации и повышения энергоэффективности объекта [15].

Известно решение устройства перегородок внутри регулирующего резервуара перед насосной станцией с целью перенаправления потока, увеличения местных скоростей для смыва осадка или

для выделения секций, предназначенных для улавливания песка. В этом ключе интересна работа авторов [16], рассматривающих установку полупогружных перегородок в подводящем канале с целью снижения его заиливания.

Возможно размещение секции для улавливания песка непосредственно в месте ввода подводящего коллектора в резервуар. Эта секция отделяется от резервуара перегородкой, которую поток преодолевает сверху. Таким образом, перегородка оказывает успокоительный эффект на поток, интенсифицируя осаждение и осуществляя задержку значительной части масс песка на дне отстойника. Подобное решение было рассмотрено и для данного проекта, но не стали его применять. К недостатку создания отдельной секции отнесем ее удаленность от площадки обслуживания, плохую промываемость, наличие глухого перекрытия и отсутствие технической возможности для устройства насосного приемка и трубопроводов для перекачки пескопульпы.

Основной целью работы было создание перегородки, которая перенаправила бы поток воды и песка таким образом, чтобы исключить поступление песка к основным насосам, но при этом обеспечить промываемость резервуара и сток песка в приямок, где располагается песковой насос. Поскольку для удаления пескопульпы требуется устройство приемка и специального насоса, то для удаления песка было решено выделить часть основного приемка под эти цели. Кроме того, перегородка должна обеспечить как перенаправление потока в резервуаре, так и полное опорожнение. В связи с этим конструкция перегородки 1 представляла собой стенку, выполненную из композитных материалов, которую устраивали вдоль насосного

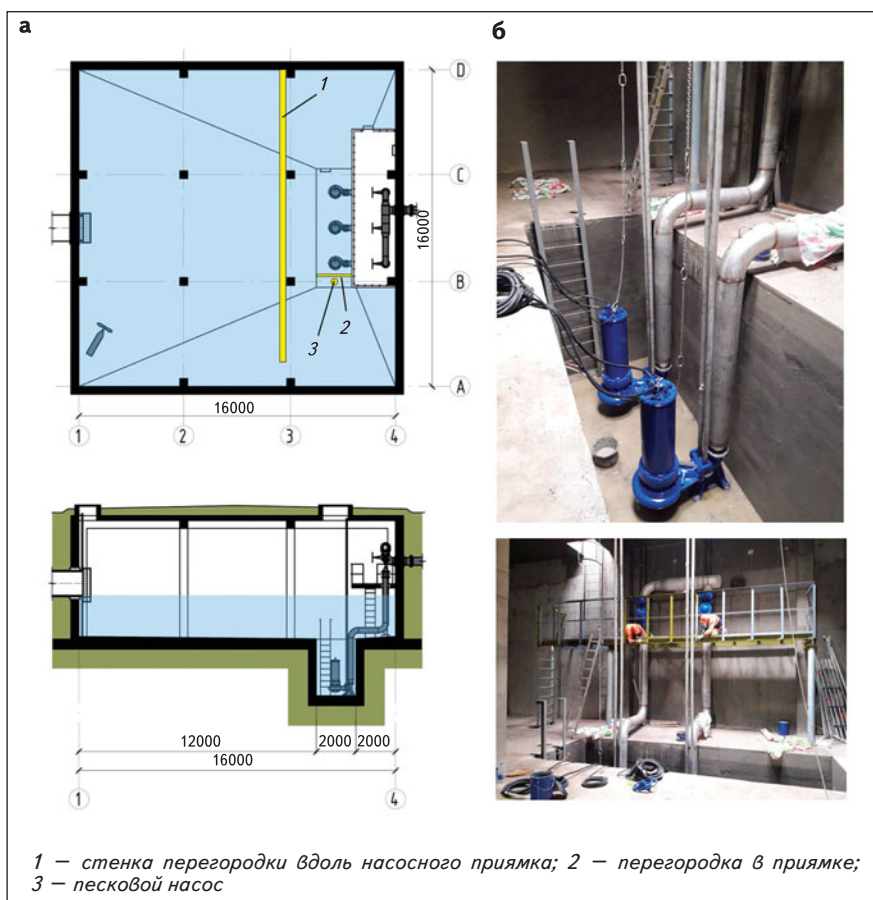


Рис. 2. Канализационная насосная станция (а), выполнение строительно-монтажных работ (б)

приямка и крепили к колоннам (см. рис. 2а). С одной стороны резервуара стенка плотно прилежала, исключая прохождение потока воды, с другой — был выполнен проем 0,7 м. После прохождения проема поток воды должен был протекать через отдельную секцию приямка, выделенную с помощью перегородки 2, в которой размещен песковой насос 3. Данное решение принято по аналогии с исследованием [17]. В нем рассмотрено устройство ловушки-приямка в колодце на канализационной сети, в которую гравитационно поступает осадок, движущийся по лотку коллектора.

Для оценки эффективности принятого решения выполнялось исследование, которое включало в себя математическое моделирование процесса движения потока воды и осаждения частиц.

Методы

В ходе пусконаладочных работ насосной станции резервуар заполняли водой из канализационной сети предприятия и проверяли включения и отключения насосных агрегатов на проектных уровнях воды. Также оценивалось КПД работы насосов на запроектированную напорную сеть. После откачки воды эксплуатирующий персонал спускался на площадку обслуживания насосной станции и производил визуальную фиксацию состояния оборудования и резервуара. В ходе данного обследования было обнаружено большое содержание песка на дне резервуара и в насосном приянке, которое было зафиксировано с помощью фотосъемки (рис. 3). Был проведен обзор научной, нормативной и технической литературы по

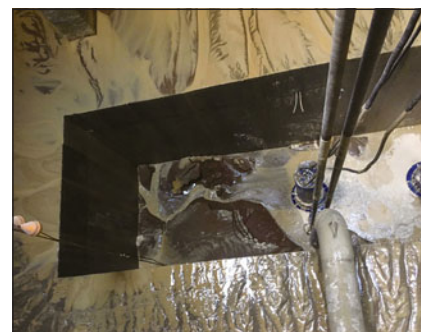


Рис. 3. Песок на дне резервуара после его осушения

различным способам решения подобных проблем.

В качестве основного инструмента для выполнения математического моделирования резервуара выбрали пакет конечно-элементного анализа ANSYS CFX. Применение моделирования достаточно часто встречается в инженерной практике и хорошо зарекомендовало себя при решении задач, связанных с гидродинамикой потока в сооружениях с геометрией различной сложности [18, 19]. Существуют работы, в которых производится оценка концентрации пескопульпы или осадка в отстойниках и резервуарах по мере движения ее к сборному приямку [20].

Первый этап моделирования — создание расчетной области резервуара в приложении Design Modeller. На основании чертежей проекта была смоделирована внутренняя полость резервуара с учетом внутренних колонн и насосных агрегатов (рис. 4). Пространство резервуара делилось на две расчетные области (нижняя и верхняя). Нижняя область предназначена для имитации заполнения резервуара водой, а верхняя представляет собой воздушную среду сооружения. Для их разделения нижний объем вытягивался в виде сплошного твердотельного элемента из материала, а верхний, в отличие от него, замораживался.

Конструктивные особенности станции, такие как колонны, на-

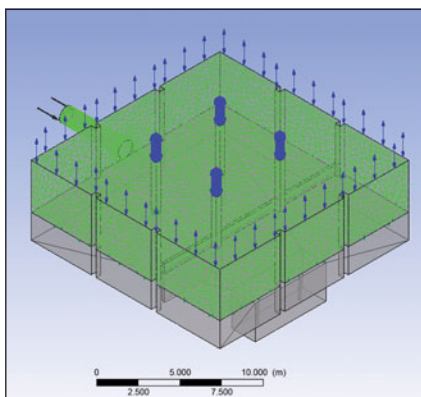


Рис. 4. Модель резервуара

сосные агрегаты и уклоны дна, создавались с помощью вырезов геометрии. Для обеих расчетных областей задавалось свойство Fluid. Также для автоматического сопряжения расчетных сеток между областями производилось их объединение в единую часть в дереве проекта. Для моделирования подводющего коллектора выполнялось вытягивание твердотельного элемента, который соединялся с верхним воздушным телом резервуара. Торцы трубы разделялись на две плоскости на эскизе для дальнейшего учета заполнения трубопровода.

Следующим этапом было построение расчетной сетки внутри выполненной геометрии. Поскольку геометрия резервуара сложная, то в основном использовалась сетка из тетраэдров, точность которой была увеличена в местах контакта воды со стенками резервуара и трубы с применением функции Inflation. Также сетка была уточнена в месте выхода потока воды в резервуар и в приемке с насосами с помощью команды Sizing (размер элемента составил 5 мм). По итогам построения сетки был выполнен контроль на соответствие следующим параметрам: Aspect Ratio < 100, Orthogonal Quality > 0,1, Skewness < 1.

Далее определялись начальные и граничные условия. В расчетных областях задавалось присутствие трех сред: воды, возду-

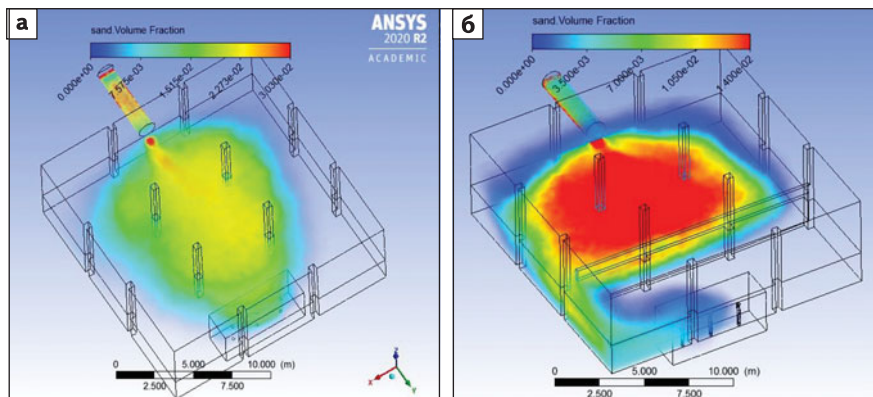


Рис. 5. Объемная доля пескопульпы в резервуаре без направляющей (а) и с направляющей (б) перегородкой

ха и пескопульпы. Пескопульпа рассматривалась как жидкая среда, плотность которой была принята по справочным данным 1300 кг/м^3 . Кроме того, в модели было задано условие гравитации по оси z и использована модель турбулентности $k-\epsilon$.

Воздух и вода представлялись как сплошные среды, а для пескопульпы было выбрано свойство диспергированной жидкости. Диаметр частиц пескопульпы был принят 1 мм. Поэтому для моделирования контакта воздуха и воды применялась модель свободной поверхности, а для контакта воды и пескопульпы — модель смешения.

В ходе моделирования решалась нестационарная задача. Общее время расчета было установлено 20 мин с шагом по времени 0,1 с. В начальный момент времени в нижней расчетной области присутствует только вода (резервуар заполнен водой до лотка подводющего коллектора), а в верхней расчетной области, включая подводный коллектор, — только воздух. Скорости обеих сред равны 0 м/с.

После настройки расчетной области были заданы граничные условия. На торцевой поверхности подводющего коллектора для плоскости, соответствующей заполнению трубы, принято граничное условие, учитывающее втеkanie воды в резервуар. Данное

условие задавалось с помощью указания массового расхода поступающего потока — 283 кг/с . Данный поток представляет собой смесь водной среды и пескопульпы с соотношением 90 и 10 % соответственно, что несколько завышено по сравнению с реальной концентрацией. Такое соотношение было выбрано в целях сокращения времени расчета и проверки работы предлагаемого решения при повышенных концентрациях песка.

Было задано условие по откачке водной среды из резервуара насосами. Для этого на двух торцах вырезов, имитирующих корпус рабочих насосов, применяли условие выхода потока, путем указания массового расхода $141,5 \text{ кг/с}$ для каждого насоса.

Для имитации воздушной среды использовали граничное условие Opening, которое указывалось для верхней расчетной области. Для этого условия задавалось избыточное давление воздушной среды, равное 0 Па.

При исследовании выполнялись расчеты по двум моделям. Первая модель соответствовала проектной конструкции насосной станции, а вторая — предусматривала наличие разделительной перегородки, осуществляющей перенаправление потока. Данные модели схожи и соответствуют приведенным выше настройкам. Отличие второй модели в том,

что дополнительный вырез в геометрии нижней расчетной области резервуара имитировал перегородку. Для записи результатов моделирования для каждого шага по времени была создана настройка Transient results в Output control.

Результаты и обсуждение

В качестве результатов моделирования были получены поля распределения объемной доли пескопульпы для обоих вариантов конструкции резервуара. Распределение осевшей массы песка для действующей конструкции резервуара представлено на *рис. 5а*. Вместе с потоком жидкости в резервуар поступают порции песка, которые преимущественно оседают в центральной части резервуара. Наибольшее объемное содержание пескопульпы (0,03) наблюдается вблизи подводящего трубопровода. На дне рядом со стенками резервуара песок практически отсутствует, что объясняется наличием прямолинейного движения жидкости в сторону насосного приемка. Результаты моделирования подтвердили процесс, протекающий в реальном сооружении, когда большие порции песка постепенно поступают в насосный приемок. Объемная доля пескопульпы в насосном приемке составляет 0,015.

Во втором варианте направление пескопульпы при откачивании воды из резервуара имеет другой характер за счет перенаправления потока перегородкой (*рис. 5б*). В данном случае перегородка создает сопротивление для откачиваемого потока, бес-

печивая формирование зоны для накопления песка, при этом движение пескопульпы вдоль перегородки все равно наблюдается, однако отсутствует прямое попадание песка в насосный приемок. По сравнению с первым вариантом объемное содержание песка в потоке, подходящем к насосному приемку, ниже и составляет 0,008. Распределение песка в объеме резервуара подобно первому варианту, но за счет влияния перегородки песок распространяется ближе к стенкам резервуара.

По результатам сравнения двух вариантов можно заключить, что перегородка обеспечивает уменьшение количества песка, поступающего к насосному приемку, и таким образом защищает от повреждения насосы и от истирания напорный полиэтиленовый водовод. Кроме того, безусловно, задержанный песок позволяет снизить нагрузку на очистные сооружения в последующем. Отмечены и недостатки: песок накапливается перед перегородкой, и не все порции песка смогут быть удалены в результате взмучивания мешалкой. Для полного удаления песка авторы данной статьи совместно со службой эксплуатации приняли решение о смыве осевшего песка чистой водой, подаваемой по шлангу в резервуар в перерывах работы насосной станции. В результате песок смывается к насосному приемку пескового насоса и автоматически откачивается.

Вывод

Требовалось решить актуальную проблему, а именно: заили-

вание песком резервуара и угрозу повреждения насосных агрегатов насосной станции, расположенной на площадке промышленного предприятия в Ленинградской обл. При строительстве и пуске насосной станции было обнаружено поступление большого количества песка, значительно превышающего норматив для сточных вод. Это позволяет говорить об обязательных изысканиях для таких объектов и создании нормативных требований, которые должны рекомендовать применение предварительной очистки. В рассмотренной ситуации данную проблему выявили уже на этапе пусконаладочных работ, поэтому задача решалась в условиях минимальных затрат и сжатых сроков.

После консультаций с заказчиком и службой эксплуатации, а также с учетом международного опыта было предложено использовать специальную направляющую перегородку внутри приемного резервуара. Для предварительной оценки эффективности выполнили моделирование работы сооружения как с перегородкой, так и без. Результаты моделирования показали снижение влияния потока пескопульпы на основные насосы, поскольку перенаправленный поток перехватывался дополнительным песковым насосом в приемке. Применение решения по устройству направляющей перегородки позволило решить вопрос износа основных насосов и сократить затраты по сравнению с вариантом полной замены насосного оборудования, который также рассматривался заказчиком.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Rinas M., Tränckner J., Koegst T. Sedimentation of raw sewage: investigations for a pumping station in Northern Germany under energy-efficient pump control [Исследование насосной станции на севере Германии с учетом мероприятий по повышению энергоэффективности насосных агрегатов]. *Water*, 2019, no. 11, p. 40. doi: 10.3390/w11010040
2. Dong J., Qian Z., Thapa B. S. et al. Alternative design of double-suction centrifugal pump to reduce the effects

- of silt erosion [Альтернативная конструкция центробежного насоса двухстороннего входа для уменьшения последствий эрозии от истирания взвешенными частицами]. *Energies*, 2019, no. 12(1), p. 158. doi: 10.3390/en12010158
3. Nalluri C., Ghani A. A., El-Zaemey A. Sediment transport over deposited beds in sewers [Движение наносов по отложениям в канализационных коллекторах]. *Water Science and Technology*, 1994, no. 29, pp. 125–133.
 4. Armstrong A., Quinton J. N. Pumped rainfall simulators: the impact of rain pulses on sediment concentration and size [Установки имитации осадков с использованием насосов: влияние пульсации дождевых расходов на концентрацию и размер взвешенных частиц]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, no. 34, pp. 1310–1314. doi: 10.1002/esp.1810
 5. Ashley R., Bertrand-Krajewski J.-L., Hvitved-Jacobsen T. Sewer solids – 20 years of investigation [Твердые частицы в канализации – 20 лет исследований]. *Water Science and Technology*, 2005, vol. 52, no. 3, pp. 73–84.
 6. Banasiak R. Hydraulic performance of sewer pipes with deposited sediments [Гидравлические характеристики канализационных труб с отложениями]. *Water Science and Technology*, 2008, no. 57(11), pp. 1743–1748. doi: 10.2166/wst.2008.287
 7. Tang Y., Zhu D. Z. Sediment depositions in a submerged storm sewer pipe [Отложения осадка в затопленной трубе ливневой канализации]. *Journal of Environmental Engineering*, 2020, no. 146(10). doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001799
 8. Xu Z., Wu J., Li H. et al. Different erosion characteristics of sediment deposits in combined and storm sewers [Различные эрозионные характеристики отложений в комбинированной и ливневой канализации]. *Water Science and Technology*, 2017. doi: 10.2166/wst.2017.076
 9. Rakhmatov N., Nazaraliev D., Uljaev F., Sapaeva M., Jumanov O. Improving the efficiency of lead exploitation pumping station channels [Повышение эффективности эксплуатации каналов насосных станций]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, no. 883, p. 012009. doi: 10.1088/1757-899X/883/1/012009
 10. Urishev B., Eshev S., Nosirov F., Kuvatov F. A device for reducing the siltation of the front chamber of the pumping station in irrigation systems [Устройство для уменьшения заиливания приемной камеры насосной станции в оросительных системах]. *E3S Web of Conferences*, 2021, no. 274, p. 03001. doi: 10.1051/e3sconf/202127403001
 11. Nasr A., Yang F., Zhang Y. et al. Analysis of the flow pattern and flow rectification measures of the side-intake forebay in a multi-unit pumping station [Анализ структуры и мер по выпрямлению потока в боковой приемной камере насосной станции]. *Water*, 2021, no. 13, p. 2025. doi: 10.3390/w13152025
 12. Verhoeven R., Huygens M., Van Poucke L. et al. Design of a smart sand trap construction as a part of an interregional environmental study [Проектирование умной конструкции пескоуловителя в рамках межрегионального экологического исследования]. *Transactions on Engineering Sciences*, 1996, vol. 9, pp. 223–232.
 13. Skibo D., Kunitsyn A., Chupin V. Analysis of the wastewater treatment device for the damper tank of sewage pumping stations [Анализ устройства для очистки сточных вод для снижения нагрузки по взвешенным веществам на резервуар канализационных насосных станций]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, no. 751, p. 012124. doi: 10.1088/1755-1315/751/1/012124
 14. Poos T. 3D parametric modeling of a sewage pumping station with separation of solids [3D-параметрическое моделирование канализационной насосной станции с отделением твердых частиц]. *Conference: VIII International Scientific Congress – INNOVATIONS*, 2021, pp. 39–42.
 15. Clark P. B., McCann E. J., Hallows G. R., Spence S. Bandra pumping station, Bombay: re-design of Bandra [Насосная станция Бандра, Бомбей: реконструкция Бандры]. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 2001, no. 50(2), pp. 61–68.
 16. Ding Y., Li T. C., Liu X. O. et al. Model test research on effect of flow accelerating board in a pumping station [Модельное тестовое исследование влияния направляющих перегородок на ускорение потока в насосной станции]. 3rd International Conference on Applied Materials and Manufacturing Technology (ICAMMT 2017). June 23–25, 2017, Changsha, China. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 242, p. 012048. doi: 10.1088/1757-899X/242/1/012048
 17. Ashley R., Fraser A., Burrows R., Blanksby J. The management of sediment in combined sewers [Регулирование количества отложений в общесплавных канализационных коллекторах]. *Urban Water*, 2000, no. 2, pp. 263–275.
 18. Gopaliya K. M., Kaushal D. R. Modeling of soil-water slurry flow through horizontal pipe using CFD [Моделирование потока почвенно-водной суспензии по горизонтальной трубе с использованием конечно-элементного анализа]. *Journal of Hydrology and Hydro-mechanics*, 2016, no. 64, pp. 261–272. doi: 10.1515/johh-2016-0027
 19. Song Y. H., Yun R., Lee E. H., Lee J. H. Predicting sedimentation in urban sewer conduits [Прогнозирование отложения осадков в городских канализационных каналах]. *Water*, 2018, no. 10, p. 462. doi: 10.3390/w10040462
 20. Ramalingam K., Xanthos S., Gong M. et al. Critical modeling parameters identified for 3D CFD modeling of rectangular final settling tanks for New York City wastewater treatment plants [Критические параметры моделирования, определенные для 3D-моделирования методом конечно-элементного анализа вторичных горизонтальных отстойников для очистных сооружений Нью-Йорка]. *Water Science and Technology*, 2012, 65.6. doi: 10.2166/wst.2012.944

«Инженерная защита территории, зданий и сооружений»

22–23 марта 2022 г. в Москве состоялась IV Международная научно-практическая конференция «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений». Организатор — Международная ассоциация фундаментостроителей.

На выставке «Строительные технологии для инженерной защиты», проходившей в рамках конференции, свою экспозицию представили компании Zinker, АО «НИЦ «Строительство», «РТ Трумер», «ТР Инжиниринг», ГК «ПЕТРОМОДЕЛИНГ», «НТП «Горизонт-М», «Ишебек Титан».

Доклад на тему «Цинкирование — технология защиты металлоконструкций от коррозии» представила компания Zinker — генеральный спонсор конференции. Об опыте реализации проекта инженерной защиты 10-километрового участка Транссибирской магистрали в Челябинской обл. сообщили представители компании Trumer Schutzbauten GmbH/ООО «РТ ТРУМЕР» (спонсор конференции).

В ходе презентации «Инженерная защита территорий с применением габионных конструкций RockBox» Н. В. Селезнева, менеджер проектов компании «ТР Инжиниринг» (спонсор конференции), отметила, что данные конструкции предназначены для защиты, стабилизации и укрепления грунтов от эрозии. Их применяют для армирования грунтов, укрепления склонов, в том числе оползневых, насыпей, откосов берегов водоемов, устройства подпорных стенок, защиты от камнепадов, снежных лавин и селевых потоков, для строительства противопаводковых сооружений, ландшафтно-восстановительных мероприятий и других целей, включая районы с высокой сейсмической активностью. Продукция компании может применяться и на многолетнемерзлых грунтах Арктической зоны.

Об опыте применения российских автоматизированных датчиков гидронивелир при мониторинге вертикальных перемещений проинформировал генеральный директор ООО «Монитрон» А. Н. Симутин. Автоматизированное гидростатическое нивелирование представляет собой технологию измерения квазистатических осадок, которая применяется для геотехнического мониторинга зданий и сооружений разных типов. В ходе презентации он рассказал, как датчики используются на различных объектах, о результатах мониторинга и достоинствах новой технологии. С помощью гидронивелира у специалистов на объектах появляется возможность оценить реальные запасы прочности конструкции и прогнозировать дальнейшее изменение напряженно-деформированного состояния как сооружений, так и основания.

В докладе «Фотограмметрические технологии мониторинга трещин в зданиях и сооружениях» технический директор ООО «Архитектурная фотограмметрия» А. Е. Войнаровский рассказал об опыте применения системы PhotoMicrometer 3D. Новейшая разработка PhotoMicrometer 1D/2D предназначена для мониторинга трещин по одной и двум координатным осям. Важными преимуществами систем является то, что они перекрывают спектр задач по мониторингу трещин и деформационных швов в зданиях и сооружениях, кроме того, они могут работать дистанционно. Обе системы позволяют учитывать температурную поправку, а высокий уровень автоматизации минимизирует влияние «человеческого фактора» на результаты наблюдений.

В связи с участвовавшими природными катаклизмами, перед специалистами остро встал вопрос построения карт климатических рисков с учетом метеостатистики. Проектированию противопаводковой защиты сооружений с использованием гидродинамического моделирования посвятил доклад технический эксперт АО «ВНИИЖТ» С. И. Дубинский, рассказавший о разработанной и верифицированной на тестовых задачах методике трехмерного гидродинамического моделирования воздействий на ИССО к учету рельефа, батиметрии и реальной формы конструкций.

А. И. Харичкин, зав. лабораторией механики опасных природно-техногенных процессов и разработки методов инженерной защиты № 18 НИИОСП им. Н. М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», прокомментировал особенности использования СП 116.13330.2012 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения» на примере проектирования и строительства инженерной защиты в условиях районов Эльбруса, Нижнего Новгорода и Москвы. На этапе проектирования было решено применить на объекте прямой метод определения прочностных свойств, основанный на сдвиге целиков грунта в природном сложении общей площадью контакта 5000 см² согласно ГОСТ 20276.4. При этом актуальные углы фактических откосов в пределах рассматриваемой территории было решено получить на основе результатов анализа объемной модели местности, полученной при аэрофотосъемке с беспилотного летательного аппарата.

Материалы конференции доступны на официальном сайте Ассоциации www.fc-union.com.

(По материалам пресс-службы Международной ассоциации фундаментостроителей)



www.scadsoft.ru

Сертификат соответствия: RA.RU.A686.N01187 действует до 07.08.2022 г. Программный комплекс SCAD Office включен в Единый реестр российских программ для ЭВМ и баз данных (https://reestr.digital.gov.ru № 2270)



ООО "АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТНЫХ РАБОТ"

Программа предназначена для экспертизы бетонных и железобетонных сечений, однопролетных и многопролетных балок и колонн, подбора арматуры в сечении, однопролетной и многопролетной балки, а также для вычисления прогибов в железобетонных однопролетных и многопролетных балках согласно действующим требованиям норм и их более ранних версий.

Подбор и проверки выполняются для железобетонных конструкций из тяжелого, мелкозернистого и легкого бетонов с применением стальной арматуры по нормам РФ или EN, а также композитной полимерной арматуры.

Расчет выполняется по предельным состояниям первой и второй группы согласно нормам РФ (при стальной арматуре по СП 63.13330, для расчета на продавливание плит около торцов стен по СП 430.1325800, при композитной арматуре согласно СП 295.1325800), Eurocode 2 (EN 1992-1-1), для заданных или импортированных из SCAD++ расчетных сочетаний усилий, а для балок в зависимости от заданных нагрузок в соответствии с требованиями СП 20.13330 "Нагрузки и воздействия", или более ранних версий норм. При выполнении расчета учитываются требования сейсмических норм СП 14.13330 и возможность расчета на огнестойкость согласно СТО 36554501-006-2006.

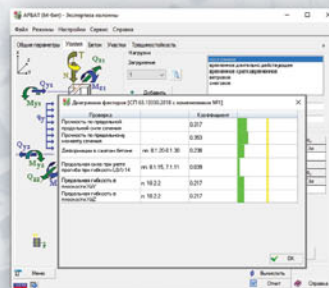
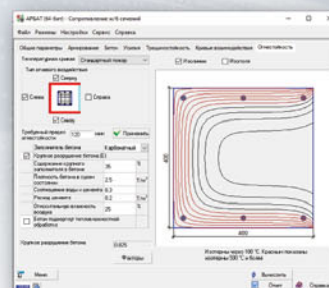
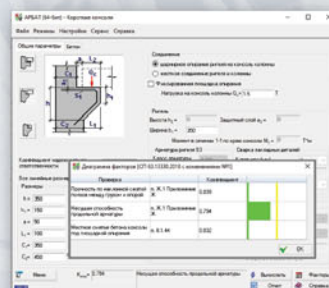
Выполняется подбор арматуры в многопролетных балках постоянного сечения (прямоугольного, таврового или двутаврового) и в колоннах (прямоугольного, таврового или кольцевого сечений) по предельным состояниям первой и второй группы (прочность и трещиностойкость). Рассматривается плоская работа балки, а также плоская и пространственная работа колонны.

Реализуется проверка элементов железобетонных конструкций на местное действие нагрузок (местное сжатие, продавливание, отрыв, закладные детали и короткие консоли) в соответствии с требованиями СП 63.13330, СП 430.1325800, а также более ранних версий норм.

Информационное обеспечение программы включает данные о бетоне, арматуре, коэффициентах условий работы и предельных прогибах.

Имеется возможность расчета длины анкеровки арматуры в бетоне и длины нахлеста арматурных стержней.

Реализован режим экспертизы прямоугольных плит с различными условиями опирания по краям (свободный, шарнирный, защемленный).



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



Научно-технические услуги СПБГАСУ

УПРАВЛЕНИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Контакты:

Тел/факс: (812) 317-80-46

E-mail: ntuslugi@spbgasu.ru



ИСПЫТАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР (Росаккредитация)

- механические, физико-технические и аналитические испытания;
- научное обоснование применения, выявление причин разрушений;
- разработка нормативной и методической документации на продукцию в строительстве и методы ее испытаний;
- работы по совершенствованию методов, методик и средств испытаний;
- изготовление различных партий уникальных изделий по чертежам заказчиков.

ЦЕНТР ИСПЫТАНИЯ ГРУНТОВ (аттестованный)

- физические и механические испытания дисперсных и скальных грунтов;
- сложные испытания грунтов по специальным программам;
- адаптация результатов испытаний к различным расчетным моделям грунтов (модуль «Soiltest» ПК «Plaxis»);
- решение задач по совершенствованию методов, методик и средств испытаний.

КОНСАЛТИНГ

НАУЧНЫЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННО-КОНСАЛТИНГОВЫЙ ЦЕНТР ГЕОТЕХНОЛОГИЙ

- научное сопровождение проектирования и строительства сложных и опасных объектов;
- научные исследования и разработки в геотехнике и геотехнологии;
- консультации и экспертизы по вопросам строительства;
- инженерно-геологические и гидрогеологические изыскания;
- геотехнический мониторинг объектов строительства и существующей застройки, в том числе высокоточные наблюдения осадок зданий, измерения параметров колебаний конструкций, определение длины и плоскости свай в грунте;
- разработка проектов на строительство фундаментов, котлованов, подвалов, дренажей и систем водоотведения;
- реконструкция и усиление фундаментов и оснований;
- привязка готовых проектов к условиям площадки строительства;
- техническое обследование зданий, дренажей, систем водоотведения, объектов незавершенного строительства.

КАФЕДРЫ

Консультационные услуги в сфере их профессиональной деятельности, в том числе:

- по вопросам инженерной подготовки территории застройки, озеленению и созданию комфортной среды и т.п.;
- по подготовке проектной документации перед прохождением экспертизы и при снятии замечаний сторонних экспертиз, в том числе государственных;
- по подготовке проектной и рабочей документации перед прохождением экспертизы, а также при снятии замечаний сторонних экспертиз, в том числе государственных;
- консультации по разработке технической и технологической документации (технических условий, стандартов организаций, технологических регламентов, инструкций, рекомендаций и др.);
- консультации по применению новых строительных материалов, технологий и т.п.

ЭКСПЕРТИЗА

ИНСТИТУТ СУДЕБНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ ЭКСПЕРТИЗ

- строительно-технические экспертизы с использованием приборной и лабораторной баз научно-технических центров и лабораторий;
- определение соответствия фактически выполненных на объекте строительно-монтажных работ условиям договора, актам КС-2 и т.п.;
- определение соответствия исполнительной документации по объекту требованиям законодательства Российской Федерации, нормативно-технической документации;
- определение соответствия качества выполненных на объекте строительно-монтажных работ требованиям нормативно-технической документации, условиям договора и др.;

- определение рыночной стоимости выполненных строительно-монтажных работ;
- определение размера причиненного ущерба, связанного со зданиями, сооружениями, конструкциями (в результате повреждения здания, случайной гибели имущества и т.д.);
- проверка смет на соответствие проекту, правильность применения расценок и т.д.;
- проведение контрольных обмеров помещений, архитектурные обмеры с использованием наземного лазерного сканирования;
- экспертиза инженерно-геодезических изысканий;
- оценка стоимости земельного участка, оценка кадастровой стоимости объекта;
- исследование экспертных заключений с составлением рецензий или отзыва на экспертизу.
- негосударственная экспертизы проектной документации и результатов инженерных изысканий;
- экспертиза и аудит проектной документации;
- оценка разделов проектной документации и принятых проектных решений требованиям технических регламентов;
- оценка проектов объектов, не подлежащих обязательной экспертизе, в том числе перепланировок для Межведомственной комиссии;
- оценка рабочей документации на соответствие принятых решений требованиям технических регламентов, а также на соответствие проектной документации, получившей положительное заключение;
- проверка достоверности определения сметной стоимости.

ИНСТИТУТ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

- заключения о возможности внесения изменений в конструкцию транспортных средств;
- оценка ущерба после ДТП и других повреждений ТС;
- оценка стоимости ТС для судебных органов, страховых компаний, нотариата, для продажи, дарения, раздела имущества, списания, переоценки и других целей;
- технические, дорожные и ситуационные экспертизы при расследовании ДТП;
- экспертные заключения о дефектах шин и колес, находящихся в эксплуатации, по нормам расхода ГСМ, по качеству ТО и ремонта ТС, по определению технических характеристик ТС; по пожарному и электротехническому состоянию ТС;
- определение технического состояния основных средств (машины, оборудование, ТС) при подготовке к списанию.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗЫСКАНИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ

ПРОЕКТНАЯ СТУДИЯ

- дизайн-проекты, проекты для строительства, реконструкции и капитального ремонта зданий и сооружений.

КАФЕДРА ДИЗАЙНА АРХИТЕКТУРНОЙ СРЕДЫ

- разработка проектов реконструкции зданий, благоустройства открытых городских пространств, элементов благоустройства;
- разработка комплексных проектов в области ландшафтной архитектуры для населенных пунктов, проектов жилых и общественных зданий.

ЛАБОРАТОРИЯ ЦИФРОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

- проектирование объектов капитального строительства с применением BIM-технологий;
- оцифровка проектной и рабочей документации жилых, общественных, промышленных зданий и сооружений;
- разработка цифровых библиотек, компонентов, узлов информационных объектов ОКС;
- создание и обработка моделей зданий для применения в виртуальной, дополненной реальности и т.д.

КАФЕДРА ГЕОДЕЗИИ, ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВА И КАДАСТРОВ

- разработка информационных цифровых моделей ландшафтных и средовых объектов;
- разработка виртуальных моделей системы объектов на основе цифровой модели территории и т.п.;
- геодезическое обеспечение всех видов строительных и землеустроительных работ.



Дополнительное профессиональное образование в СПБГАСУ

Контакты:

Тел.: (812) 316-15-25, 495-36-07, 317-93-54

E-mail: ipk@spbgasu.ru



Институт повышения квалификации и профессиональной переподготовки специалистов приглашает на обучение по дополнительным профессиональным программам в сфере строительства и архитектуры

Повышение квалификации по направлениям (от 16 до 160 академических часов):

- строительство, реконструкция, капитальный ремонт объектов капитального строительства;
- подготовка проектной документации объектов капитального строительства;
- инженерные изыскания для объектов капитального строительства;
- охрана труда в строительстве (со стажировкой в парке безопасности «Полигон «Умный труд»);
- сметное дело;
- технологии информационного моделирования (с использованием в том числе nanoCAD, Renga, Tekla Structures и др.).

Профессиональная переподготовка (до 860 академических часов):

- промышленное и гражданское строительство;
- архитектурное проектирование жилых и общественных зданий;
- реконструкция и реставрация архитектурного наследия;
- водоснабжение и водоотведение;
- теплогазоснабжение и вентиляция;
- судебная строительно-техническая и стоимостная экспертиза объектов недвижимости;
- экономика и управление строительной организацией.

По окончании обучения слушателям выдается удостоверение о повышении квалификации или диплом о профессиональной переподготовке.

